p-ISSN 1607-3274
e-ISSN 2313-688X

Радіоелектроніка
Інформатика
Управління

Радиоэлектроника
Информатика
Управление

Radio Electronics
Computer Science
Control

ISSN 1607-3274

2019/2

Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал
Виходить чотири рази на рік
№ 2(49) 2019
Заснований у січні 1999 року.
Засновник і видавець – Запорізький національний технічний університет.
ISSN 1607-3274 (друкований), ISSN 2313-688X (електронний).
Запоріжжя
ЗНТУ
2019

Запорожский национальный технический университет

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал
Выходит четыре раза в год
№ 2(49) 2019
Основан в январе 1999 года.
Основатель и издатель – Запорожский национальный технический университет.
ISSN 1607-3274 (печатный), ISSN 2313-688X (электронный).
Запорожье
ЗНТУ
2019

Zaporizhzhia National Technical University

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal
Published four times per year
№ 2(49) 2019
Founded in January 1999.
Founder and publisher – Zaporizhzhia National Technical University.
ISSN 1607-3274 (print), ISSN 2313-688X (on-line).
Zaporizhzhia
ZNTU
2019

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

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

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

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

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

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

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

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

Опублікованими статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

Журнал входить до наукометричної бази Web of Science.

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

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

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

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

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

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

Члени редколегії:

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

Рекомендовано до видання вченою радою ЗНТУ, протокол № 10 від 03.06.2019.

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом ЗНТУ.

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

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

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

Факс: (061) 764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Запорізький національний технічний університет, 2019

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

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

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

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

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

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

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

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

Журнал входит в наукометрическую базу Web of Science.

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Члены редколлегии:

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

Рекомендовано к изданию ученым советом ЗНТУ, протокол № 10 от 03.06.2019.

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, 2019

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is included into Web of Science.

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

Members of Editorial Board:

I. Androulidakis, PhD, Greece
V. M. Bezruk, Doctor of Science in Engineering, Ukraine
Ye. V. Bodyanskiy , Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Control section editor
O. O. 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, PhD, Slovakia
A. Lisnianski, PhD, Israel
U. Markowska-Kaczmar, Doctor of Science, Poland
V. A. Oleshchuk, PhD in Physics and Mathematics, Norway, Radio Electronics section editor
V. M. Onufrienko, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine
M. Paprzycki, PhD, Poland
V. V. Pogosov, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine
O. V. Rubel, PhD, Canada
A. A. Sharpanskykh, PhD, Netherlands, Computer Science section editor
S. N. Vassilyev, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Academican of Russian Academy of Sciences, Russia
E. N. Zaitseva, PhD, Slovakia

Recommended for publication by the Academic Council of ZNTU, protocol № 10 dated 03.06.2019.

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

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

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

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

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

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Zaporizhzhia National Technical University, 2019

ЗМІСТ

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....7
Суліма С. В.
МЕТОД ФОРМУВАННЯ СЛАЙСІВ МУЛЬТСЕРВІСНОЇ БАЗОВОЇ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ……..7
Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКА В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ «POLYSWITCH»……...15
Tyurin S. F.
INVESTIGATION OF A HYBRID REDUNDANCY IN THE FAULT-TOLERANT SYSTEMS……..23
Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N.
METHOD FOR PREDICTING THE DURABILITY OF ELECTRONIC EQUIPMENT……34
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....44
Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I.
POLYNOMIAL SOLUTIONS FOR THE KOLMOGOROV-WIENER FILTER WEIGHT FUNCTION FOR FRACTAL PROCESSES……...44
Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Павлик А. В., Кошевая И. И., Рожнова Т. Г.
ИССЛЕДОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ПЛАНОВ МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МИНИМАЛЬНЫМ ЧИСЛОМ ПЕРЕХОДОВ УРОВНЕЙ ФАКТОРОВ……..53
Melnyk K. V., Borysova N. V.
IMPROVING THE QUALITY OF CREDIT ACTIVITY BY USING SCORING MODEL……60
Тарасов В. Н.
АНАЛИЗ ДВУХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НЕ2/М/1 С ОБЫЧНЫМИ И СДВИНУТЫМИ ВХОДНЫМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ……71
Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I.
A COMBINED APPROACH TO MODELING NONSTATIONARY HETEROSCEDASTIC PROCESSES……80
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....90
Grygor O. O.,Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M.
OPTIMIZATION METHOD BASED ON THE SYNTHESIS OF CLONAL SELECTION AND ANNEALING SIMULATION ALGORITHMS……...90
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....100
Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Стяглик Н. І.
ВИВЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДЕЛІ БЛОЧНОГО ПОДАННЯ ДЛЯ МНОЖИНИ ДЕСКРИПТОРІВ КЛЮЧОВИХ ТОЧОК ЗОБРАЖЕНЬ……100
Khabarlak K. S., Koriashkina L. S.
SCOPING ADVERSARIAL ATTACK FOR IMPROVING ITS QUALITY……108
Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V.
TRAINER AND TRAINEES MODELING BASED ON COMPLEX INFORMATION APPROACH TO IMPROVEMENT OF TRAINING INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS……..119
Марценюк В. П., Сверстюк А. С.
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КІБЕР-ФІЗИЧНОЇ ІМУНОСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ НА ГЕКСАГОНАЛЬНІЙ РЕШІТЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕШІТЧАСТИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ІЗ ЗАПІЗНЕННЯМ……..131
Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V.
APPROACHES GOING TO DETERMINATION PERIODS OF THE HUMAN FACTOR OF NAVIGATORS DURING SUPERNUMERARY SITUATIONS……...140
Процько І. О., Кузьмінський Р. Д., Теслюк В. М.
ЕФЕКТИВНЕ ОБЧИСЛЕННЯ ЦІЛОЧИСЕЛЬНОГО ДКП-ІІ ДЛЯ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ……151
Prykhodko N. V., Prykhodko S. B.
A MULTIPLE NON-LINEAR REGRESSION MODEL TO ESTIMATE THE AGILE TESTING EFFORTS FOR SMALL WEB PROJECTS……158

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....177
Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М.
МЕТОД ОЦЕНКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ГАЗОБЕТОННОГО ПРОИЗВОДСТВА……177
Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T.
LINEARIZATION OF OBJECT MODEL WITH VECTOR CONTROL……...189
Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu., Kniazieva V. N., Khoroshun D. M., Fursova T. N.
UNIFIED BASIC SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR PRECISION ENERGY-SAVING SYSTEMS OF AUTOMATIC REGULATION AND CONTROL……202

CONTENTS

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....7
Sulima S. V.
METHOD FOR FORMING OF MULTISERVICE CORE MOBILE COMMUNICATION NETWORK SLICES……..7
Tonkoshkur A. S., Nakashidze L. V.
MODELING OF CURRENT LIMITATIONS IN PHOTO-ELECTRICAL SYSTEMS OF SOLAR BATTERIES USING SELF-RESTORING FUSES POLYSWITCH……..15
Tyurin S. F.
INVESTIGATION OF A HYBRID REDUNDANCY IN THE FAULT-TOLERANT SYSTEMS……..23
Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N.
METHOD FOR PREDICTING THE DURABILITY OF ELECTRONIC EQUIPMENT……....34
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....44
Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I.
POLYNOMIAL SOLUTIONS FOR THE KOLMOGOROV-WIENER FILTER WEIGHT FUNCTION FOR FRACTAL PROCESSES……...44
Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Pavlyk A. V., Koshevaya I. I., Rozhnova T. G.
RESEARCH OF MULTIPLE PLANS IN MULTI-FACTOR EXPERIMENTS WITH A MINIMUM NUMBER OF TRANSITIONS OF LEVELS OF FACTORS……53
Melnyk K. V., Borysova N. V.
IMPROVING THE QUALITY OF CREDIT ACTIVITY BY USING SCORING MODEL……60
Tarasov V. N.
THE ANALYSIS OF TWO QUEUING SYSTEMS HE2/M/1 WITH ORDINARY AND SHIFTED INPUT DISTRIBUTIONS…….71
Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P.I.
A COMBINED APPROACH TO MODELING NONSTATIONARY HETEROSCEDASTIC PROCESSES……80
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....90
Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M.
OPTIMIZATION METHOD BASED ON THE SYNTHESIS OF CLONAL SELECTION AND ANNEALING SIMULATION ALGORITHMS……..90
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....100
Gorokhovatsky V. A., Gadetska S. V., Stiahlyk N. I.
THE STUDY OF STATISTICAL PROPERTIES OF THE MODEL BLOCK REPRESENTATION FOR SET OF DESCRIPTORS OF KEY POINTS OF IMAGES……...100
Khabarlak K. S., Koriashkina L. S.
SCOPING ADVERSARIAL ATTACK FOR IMPROVING ITS QUALITY……108
Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V.
TRAINER AND TRAINEES MODELING BASED ON COMPLEX INFORMATION APPROACH TO IMPROVEMENT OF TRAINING INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS……..119
Martsenyuk V. P., Sverstiuk A. S.
COMPUTER MODELING OF CYBER-PHYSICAL IMMUNOSENSOR SYSTEM IN A HEXAGONAL LATTICE USING LATTICE DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH DELAY……...131
Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V.
APPROACHES GOING TO DETERMINATION PERIODS OF THE HUMAN FACTOR OF NAVIGATORS DURING SUPERNUMERARY SITUATIONS……...140
Prots'ko I. O., Kuzminskij R. D., Teslyuk V. M.
EFFICIENT COMPUTATION OF THE INTEGER DCT-II FOR COMPRESSING IMAGES……151
Prykhodko N. V., Prykhodko S. B.
A MULTIPLE NON-LINEAR REGRESSION MODEL TO ESTIMATE THE AGILE TESTING EFFORTS FOR SMALL WEB PROJECTS……158

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....177
Kaminska Zh. K., Serdiuk S. N., Kulynych E. M.
THE METHOD OF OPERATOR'S ACTIVITY ESTIMATION FOR THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM IN AERATED CONCRETE PRODUCTION……...177
Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T.
LINEARIZATION OF OBJECT MODEL WITH VECTOR CONTROL……...189
Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu., Kniazieva V. N., Khoroshun D. M., Fursova T. N.
UNIFIED BASIC SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR PRECISION ENERGY-SAVING SYSTEMS OF AUTOMATIC REGULATION AND CONTROL……202

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.391+004.7

МЕТОД ФОРМУВАННЯ СЛАЙСІВ МУЛЬТСЕРВІСНОЇ БАЗОВОЇ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Суліма С. В. – асистент кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Зі зростанням об'єму трафіку мобільних даних та числа сервісів, які надаються мобільною мережею, зростають і потоки службового навантаження, що викликає потребу у зміні принципів, моделей та методів організації обслуговування телекомунікаційних потоків з метою забезпечення заданої якості надання широкого кола послуг гнучким та економічно ефективним способом. Переваг масштабованості та еластичності з підтримкою високого показника коефіцієнта використання технічних ресурсів мережі можна досягти з використанням технологій віртуалізації та концепції мережевого слайсингу, що дозволяє розгортати виділені мережі на основі сервісів, застосовуючи методи віртуалізації мережевих функцій. У цьому контексті основним залишається питання, яка кількість мережевих слайсів буде доцільною з точки зору затрат на керування слайсами і забезпечення потрібної функціональності.

Мета. Підвищення ефективності роботи мобільної мережі за допомогою оптимального формування слайсів мультсервісної мережі зв'язку.

Метод. Аналіз публікацій, присвячених віртуалізації мережевих функцій, дав змогу виявити підхід до організації використання ресурсів мультисервісної мобільної мережі, а також показав недостатню ефективність існуючих рішень щодо важливих питань цього процесу (продуктивності алгоритму формування слайсів, рівня функціональних витрат).

Результати. Пропонується метод моделювання системи розподілу ресурсів мережі, що передбачає формування мережевих виділених слайсів, які обслуговують визначені види сервісів незалежно на спільній інфраструктурі.

Висновки. У статті вирішено завдання побудови методу формування слайсів мультсервісної базової мережі мобільного зв'язку, який завдяки ефективному динамічному налаштуванню конфігурації роботи системи, дозволяє забезпечити надання широкого кола сервісів з заданими показниками якості. Побудовано модель системи організації ресурсів, за допомогою якої представлено метод, який враховує витрати, пов'язані з надмірним виділенням ресурсів, а також зменшує кількість перерахунків конфігурації мережі, що дозволяє досягати раціонального співвідношення затрат на управління та підсумкового значення якості обслуговування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Network Functions Virtualization, управління ресурсами, мережевий слайсинг, виділена мережа, Evolved Packet Core.

АББРЕВІАТУРИ

CAPEX – Capital Expenditure;
eNB – Evolved Node B;
EPC – Evolved Packet Core;
HSPA – High Speed Packet Access;
HSS – Home Subscriber Server;
LTE – Long-Term Evolution;
M2M – Machine-to-Machine;
MME – Mobility Management Entity;
NFV – Network Functions Virtualization;
NGMN – Next Generation Mobile Networks Alliance;
OPEX – Operating Expense;
PGW – Public data network Gateway;
SDN – Software-Defined Networking;
SGW – Serving Gateway;
SMF – Service-slice Mapping Function;
UE – User Equipment.

НОМЕНКЛАТУРА

$p^{NS}{}_k$ – системна продуктивність слайсу k;
$p^{S}{}_j$ – вимоги продуктивності сервісу j;
rth – порогове значення відносних функціональних витрат;
rw_k – відносні функціональні витрати слайсу k;

© Суліма С. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-1

s_k – набір сервісів слайсу k;
th – порогове значення функціональних витрат;
w_k – функціональні витрати слайсу k.

ВСТУП

У мережах мобільного зв'язку спостерігається значне зростання трафіку, що пов'язано зі збільшенням використання смартфонів, диференційованості послуг та іншими факторами. Сучасні телекомунікаційні системи будуються як складні мережі, які охоплюють різні типи пристроїв, об'єднаних в єдиний комплекс, працюють в умовах великих потоків навантаження та великої кількості з'єднань [1]. Крім того, середня вимога сигналізації на одного абонента до 42% вище у LTE, порівнюючи зі стандартом зв'язку HSPA [2].

Як показано на рис. 1, різноманітні сервіси будуть надаватися безпровідними мережами [3]. Останні нововведення в мобільних телекомунікаційних технологіях та мобільних терміналах стимулюють розповсюдження різних сервісів із широким діапазоном вимог щодо затримки, мобільності та надійності серед інших [4].

В даний час мобільні мережі надають в основному послуги голосу та передачі даних через архітектуру Evolved Packet Core (EPC). EPC – це архітектура повністю IP мережі, яка обслуговує всі сервіси та різні типи користувальницького обладнання (UE), такі як смартфони та пристрої міжмашинної взаємодії M2M.

На сьогоднішній день виникає необхідність у розробці нових підходів до організації надання сервісів, які будуть забезпечувати програмованість відповідно до вимог кінцевих користувачів та типів сервісів.

Об'єктом дослідження є процес побудови конфігурації мережі.

Предметом дослідження є моделі та методи формування слайсів шляхом групування сервісів з подібними характеристиками.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи мобільної мережі за допомогою оптимального формування слайсів мультсервісної мережі зв'язку.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

EPC розроблено з використанням архітектурного підходу «для будь-якого випадку» для підтримки всіх типів трафіку, які обробляються аналогічно елементами базової мережі, такими як SGW та PGW [4]. Централізована фіксована архітектура, складність, статичність є факторами, які стримують розвиток мобільних мереж. Крім того, ситуацію ускладнює надмірність функціональності. Наприклад, MME використовується в системі для управління мобільністю користувача в EPC, однак не все обладнання користувача (UE) потребує підтримки мобільності (наприклад, сенсори міжмашинної взаємодії M2M мають фіксоване географічне положення протягом експлуатаційного терміну). При цьому вимоги розвитку диктують необхідність у швидкому та гнучкому розгортанні нових різноманітних сервісів. Крім того, протягом дня навантаження на мережу змінюється. Тому відповідно до досліджень [5] до 80% обчислювальної потужності базових станцій і до половини потужності базової мережі є невикористаними. Це призводить до низького використання ресурсів, а також до високого рівня споживання енергії, що знижують економічну ефективність мережі для операторів зв'язку.

Таким чином, постає задача побудови мобільної мережі зі здатністю підтримувати різноманітні сервіси з забезпеченням заданих вимог до обслуговування, ефективно використовуючи технічні ресурси оператора зв'язку. Вихідними даними будуть виступати вимоги до продуктивності сервісу j, які задаються як $p^S_j=[p^S_{j,1}, p^S_{j,2},\ldots, p^S_{j,l}]$, де l представляє собою кількість системних параметрів продуктивності. В результаті потрібно отримати кількість виділених мереж $|k|$ та l параметрів кожної з них так, щоб мінімізувати втрати ресурсів оператора та експлуатаційні витрати.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Недоліки поточної EPC можна підсумувати наступним чином [4]:

1) Архітектура системи.

Вона не є ні здатною, ні ефективною для підтримки великого різноманіття сервісів (особливо з суворими вимогами) через негнучкість.

2) Обробка пакетів.

Пакети даних недоцільно обробляються багатьма елементами мережі, що простягаються в мобільній мережі (від eNB, SGW до PGW). Багато з цих процесів дублюються в різних функціональних елементах.

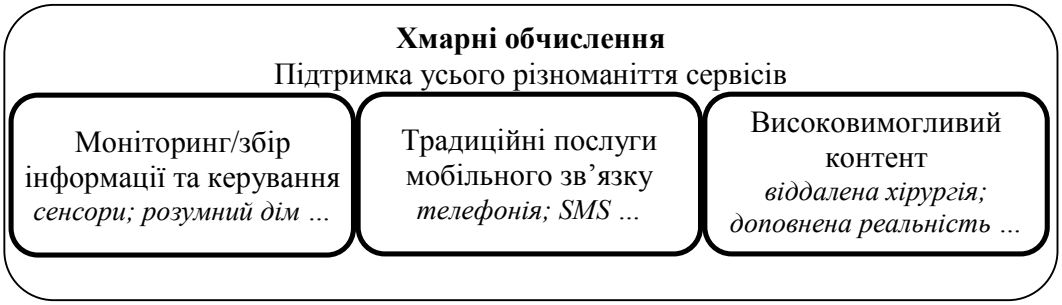


Рисунок 1 – Сервіси в епоху мереж майбутніх поколінь

© Суліма С. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-1

3) Стан абонента.

Одні й ті самі стани користувачів підтримуються в кількох мережевих елементах.

4) Час для виходу на ринок.

Традиційна мережа EPC має довгий час розгортання через цикл розгортання обладнання.

5) Вартість.

Високі капітальні та операційні витрати (CAPEX і OPEX).

Для вирішення цих проблем пропонується застосовувати технології віртуалізації [6].

Віртуалізація Мережевих Функцій NFV описується в рамках специфікацій Європейського інституту стандартів телекомунікацій (ETSI). Принцип NFV [7], спрямований на перетворення мережевих архітектур шляхом впровадження мережевих функцій в програмному забезпеченні, що може працювати на стандартній апаратній платформі. Мережева функція є функціональним блоком в межах мережевої інфраструктури, яка має чітко визначені зовнішні інтерфейси і чітко визначену функціональну поведінку. Прикладами мережевих функцій є елементи в мережі ядра LTE EPC, наприклад MME, HSS і т.д. Таким чином, віртуалізована мережева функція є реалізацією мережевої функції, яка розгорнута на віртуальних ресурсах, таких як віртуальний процесор та пам'ять віртуальної машини.

NFV тісно пов'язана з іншими новими технологіями, такими як SDN [8]. SDN – це мережева технологія, яка відокремлює площину управління від нижчерозташованої площини даних і об'єднує функції управління в логічно централізованому контролері.

З метою задоволення широкого спектру вимог в епоху 5G, різні телекомунікаційні організації працюють над вищезгаданими питаннями. Наприклад, NGMN використовує поняття «мережевих слайсів», які встановлюють виділені віртуальні мережі на основі сервісів, застосовуючи методи віртуалізації мережевих функцій NFV з використанням слайсів та SDN (рис. 2) [9].

Слайсинг мережі дозволяє побудувати (завдяки мережевій архітектурі) майбутні мережі 5G, що охоплюють необхідні характеристики масштабованості та гнучкості, таким чином, підтримуючи різноманітні сценарії обслуговування та послуги. Мережевий слайс може бути визначений як логічно ізольована мережа, яка включає в себе пристрої 5G, а також мережеві функції доступу, транспортування та ядра [10].

Концепція слайсингу може бути однією з ключових характеристик мережі 5G; однак, ресурси функціональних сутностей, що виділяються кожному слайсу, є ексклюзивними та ізольованими. Таким чином, архітектура «слайс-на-сервіс», яка виділяє ресурси слайсів кожному сервісу для забезпечення вимог до продуктивності, призведе до втрати виграшу мультиплексування. Крім того, оператори повинні створювати та керувати величезною кількістю слайсів для різних сервісів, тому експлуатаційні витрати збільшаться. Ефективним способом зменшення таких експлуатаційних витрат є створення слайсів, де на кожному слайсі розміщується група зі схожими мережевими вимогами, тим самим зменшується загальна кількість слайсів [9]. Таким чином, основним залишається питання, якою буде розумна або оптимальна кількість мережевих слайсів. Хоча більша їх кількість може призвести до величезних затрат на керування та обслуговування слайсів, з іншого боку, обмеження кількості також може створити вузьке місце з точки зору функціональності [4].

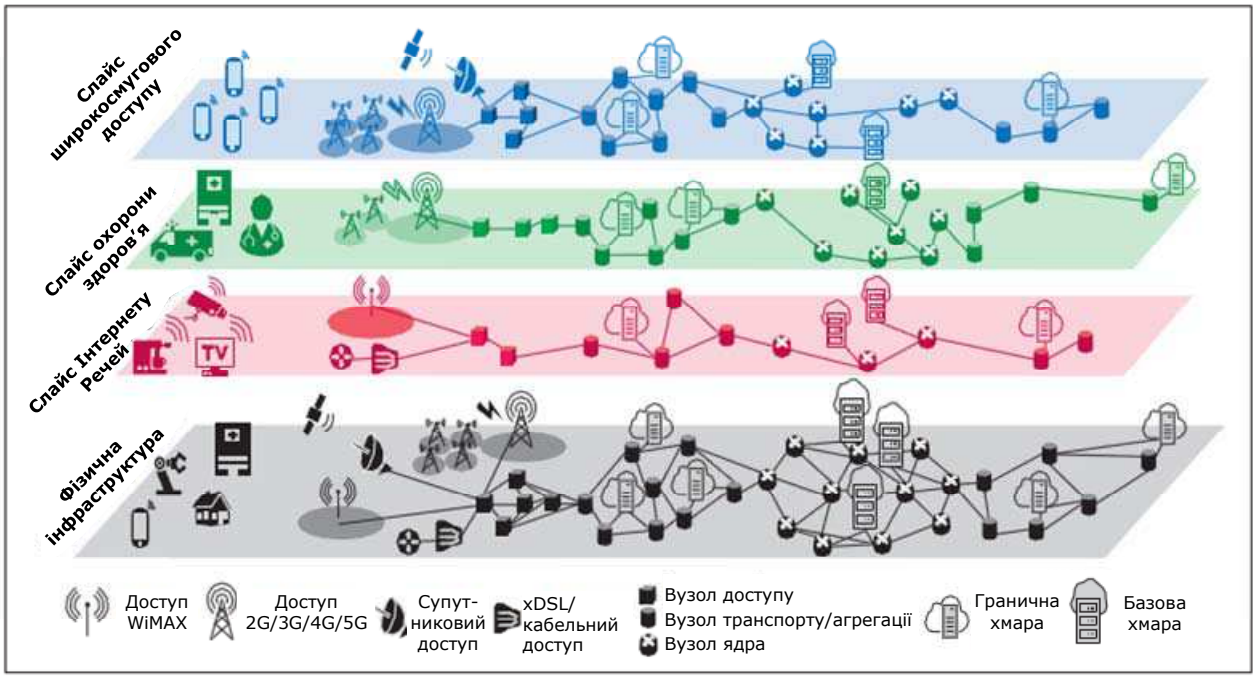


Рисунок 2 – Мережеві слайси 5G, що працюють на спільній мульти-вендорній мережі. Кожен слайс керується незалежно та відповідає конкретній задачі [11]

© Суліма С. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-1

У даній роботі удосконалено підхід «слайс-нагрупу» та метод формування сервісів у слайси. Прототипом запропонованого методу виступають принципи, описані у [9], однак удосконалений механізм врахування витрат продуктивності дозволив зменшити кількість перерахунків оптимальної кількості мережевих слайсів та зменшити витрати ресурсів.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Пропонований метод відображення сервісів на слайси, показаний на рис. 3.

Метод складається з наступних чотирьох кроків.

1. Перевіряється чи сервіс потребує ізольованого слайсу. Якщо це так, готується виділений слайс.

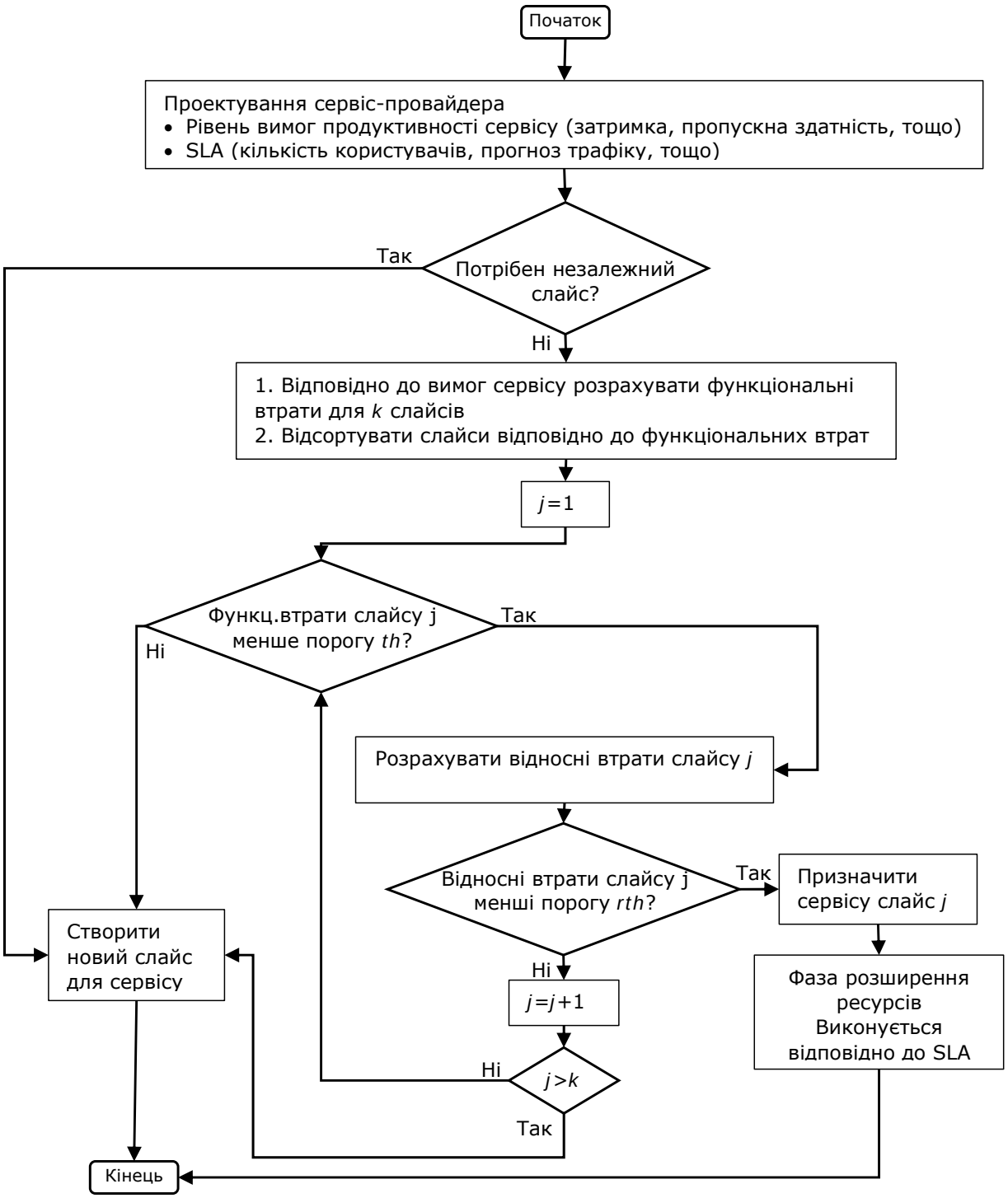


Рисунок 3 – Відображення сервісів на слайси

© Суліма С. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-1

2. Якщо сервіс дозволяє об'єднання з іншими сервісами, обчислюються «функціональні втрати» (w_k) кожного слайсу. Кожен слайс моделюється як $N_k(s_k,p^{NS}{}_k)(k=1,2\ldots n)$, s_k являє собою набір $m_k \subset M$ сервісів, що розміщуються у слайсі k (наприклад, M={повсюдне відео, електронна охорона здоров'я,...}). $p^{NS}{}_k$ представляє системну продуктивність слайсу, що складається з декількох параметрів (наприклад, затримки, пропускної здатності та щільності UE). Отже, $p^{NS}{}_k=[p^{NS}{}_{k,1}, p^{NS}{}_{k,2},\ldots, p^{NS}{}_{k,l}]$ а l представляє собою кількість системних параметрів продуктивності. У слайсі вимоги продуктивності сервісу j задаються як $p^S{}_j=[p^S{}_{j,1}, p^S{}_{j,2},\ldots, p^S{}_{j,l}]$.

Алгоритм функції відображення сервісів на слайси (Service-slice Mapping Function – SMF) обчислює w_k на кожному слайсі як

$$w_k = \sum_{i=1}^{l} w_{k,i}\,, \tag{1}$$

$$w_{k,i} = \left| p_{k,i}^{NS} - p_{k,j}^{S} \right|. \tag{2}$$

Якщо продуктивність слайсу відрізняється від вимог до продуктивності сервісу, SMF обчислює різницю між кожним параметром як «суб-функціональні втрати $w_{k,i}$».

3. Значення w_k всіх слайсів сортуються. Тоді мінімальне w_k порівнюється з заданим порогом th. Якщо воно перевищує th, SMF створює новий слайс для сервісу; в іншому випадку, обчислюються відносні втрати rw_k, припускаючи, що SMF розміщає сервіс в слайсі k.

$$rw_k = \sum_{i=1}^{l} rw_{k,i}\,, \tag{3}$$

$$rw_{k,i} = \max_{g} \left| p_{k,i}^{NS} - p_{g,i}^{S} \right|. \tag{4}$$

4. rw_k порівнюється з заздалегідь визначеним порогом rth. Якщо воно перевищує rth, SMF повторює крок 3 для наступного слайсу у відсортованому наборі; в іншому випадку, SMF розміщає сервіс в слайсі k. Якщо жоден із слайсів не задовольняє границю th або rth, створюється новий слайс.

Якщо SMF не створює новий слайс для сервісу, після того, як вибрано відповідний слайс для сервісу, SMF обчислює необхідну кількість додаткових ресурсів на основі інформації про трафік сервісу, кількості абонентів, шаблону трафіку сервісу і виграшу статистичного мультиплексування слайсу. Потім SMF наказує системі керування та оркестровки збільшити ресурси слайсу відповідно до результату розрахунку.

Якщо EPC має th рівний нескінченності, то всі сервіси мультиплексуються в один слайс і збільшуються функціональні втрати, тоді як архітектура слайс-на-сервіс, яка виділяє окремий слайс для кожного сервісу, має th рівний нулю.

Метод гарантує, що, якщо продуктивність слайсу збільшується, функціональні втрати сервісів не перевищать порогові значення.

Для того, щоб знайти оптимальну організацію слайсів доцільно провести обчислення алгоритму для кількох різних порогових значень функціональних втрат та порівняти з отримуваним виграшем по об'єднанню сервісів у групи та експлуатаційним витратам. Після чого порівняти можливі варіанти формування слайсів і обрати найбільш ефективний. Функція виграшу мультиплексування $f_1(m_k)$ використовується для кількісної оцінки групування сервісів. Експлуатаційні витрати являють собою функцію $f_2(n)$ капітальних та операційних витрат. Таким чином, для різних th обчислюється згортка, наприклад адитивна з ваговими коефіцієнтами u_1, u_2, u_3:

$$U=u_1 w_k + u_2 f_1(m_k) + u_3 f_2(n),$$

та обирається оптимальний варіант організації системи слайсів.

Після того, як слайси сформовані відбувається етап оптимальної побудови та відображення віртуалізованих мережевих слайсів на нижчерозташовану фізичну інфраструктуру з урахуванням доступності ресурсів, інтенсивності навантаження та вимог якості.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Пропонований алгоритм відображення сервісів на слайси було змодельовано та оцінено у програмному пакеті Mathcad, а також визначено взаємозв'язок між пороговими значеннями та функціональними втратами для 24 сервісів з чотирма параметрами вимог до продуктивності системи. Параметри сервісів генерувались випадковим чином рівномірно розподіленими числами.

Були використані три порогових значення: один, два, і три. Для порівняння пропонованого методу відображення сервісів на слайси були оцінені звичайний метод EPC (у випадку нескінченного порога, тобто будь-який тип сервісів може бути розміщений у слайсі EPC) та архітектура сервіс-на-слайс (у випадку порога рівного нулю, тобто лише один тип сервісів може бути розміщений у одному слайсі), а також метод [9].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Кількість слайсів і функціональні втрати по відношенню до різних порогових значень наведено на рис. 4. Як показано на рисунку, при зростанні порогового значення запропонований алгоритм зменшує кількість слайсів. З іншого боку, обсяг функціональних втрат збільшується зі збільшенням порогового значення.

Було здійснено оцінку роботи методу порівняно з методом [9], результати експериментів наведено в табл. 1.

© Суліма С. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-1

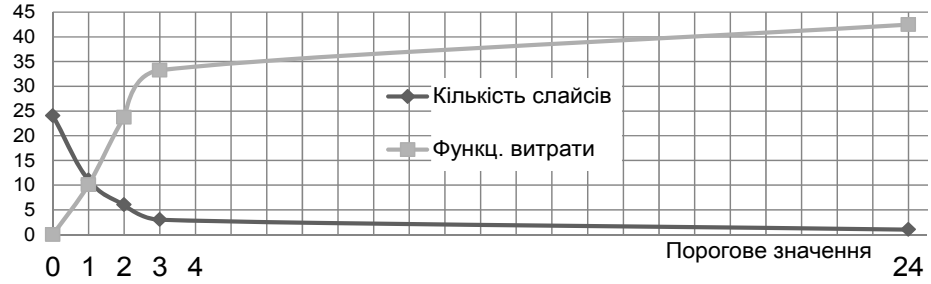


Рисунок 4 – Результати моделювання системи формування слайсів. Кількість слайсів та функціональні витрати в залежності від порогового значення *th*

Таблиця 1 – Результати експериментів

	Метод [9]		**Удосконалений метод**	
Поріг	Кількість слайсів	Функц. витрати	Кількість слайсів	Функц.витрати
0	24	0	24	0
1	8	12,2	11	10,1
2	4	24,2	6	23,8
3	1	42,5	3	33,3
24	1	42,5	1	42,5

6 ОБГОВОРЕННЯ

Результати моделювання вказують на те, що існує компроміс між кількістю слайсів і функціональними втратами. Відповідно, запропонований алгоритм надає оператору мережі засіб вибору відповідного порога, який врівноважує кількість слайсів (а саме, задовольняє вимоги до продуктивності сервісів) та витрати ресурсів.

Метод було порівняно з аналогічним методом, запропонованим у [9], що показало можливість зменшити функціональні втрати в середньому на 13%, та прискорити процес знаходження рішення до 8%.

ВИСНОВКИ

Аналіз принципів побудови мереж мобільного зв'язку дозволив виявити основні тенденції розвитку телекомунікаційних систем та проблеми, що стоять на їх шляху. Він показав, що ключовими будуть технології побудови виділених віртуалізованих мереж, які будуть мати здатність обслуговувати динамічний трафік різноманітних сервісів, підтримуючи задані показники вимог до обслуговування економічно ефективним способом. Забезпечуючи роботу таких систем, слід ретельно організувати конфігурацію такого комунікаційно-обчислювального середовища.

У статті обговорювалось те, що потрібні методи формування «мережевих слайсів», які будуть встановлювати виділені віртуальні мережі на основі сервісів, що групуються відповідно до їх функціональної близькості. Для вирішення завдання формування слайсів мультсервісної базової мережі мобільного зв'язку представлено удосконалений метод, який на основі моделі системи організації ресурсів, враховує витрати, пов'язані з надмірним виділенням ресурсів, а також зменшує кількість перерахунків конфігурації мережі, що дозволяє досягати раціонального співвідношення затрат на управління та підсумкового значення якості обслуговування мережних сервісів.

Проведено оцінку методу з використанням моделювання в системі Mathcad. Результати показали, можливо раціонально розподіляти ресурси системи, особливо при порівнянні з аналогічним підходом, функціональні втрати вдалося зменшити в середньому на 13%.

Метод може застосовуватись для керування розгортанням віртуалізованих мультмисервісних мереж на нижче розташованій фізичній мережі для мінімізації витрат оператора зв'язку та покращення якості обслуговування абонентів.

Подальші дослідження спрямовані на розробку методу відображення сформованих слайсів на фізичну інфраструктуру.

ПОДЯКИ

Роботу проведено в рамках ініціативної роботи: «Технологія забезпечення якості обслуговування телекомунікаційних сервісів при частковому руйнуванні фізичного обладнання» (Номер державної реєстрації – 0117U001861).

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. The Intellectual IoT-System for Monitoring the Base Station Quality of Service / [L. Globa, V. Kurdecha, I. Ishchenko et al.] // 2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 4–7 June 2018 : conference proceedings. – Batumi, Georgia, 2018. – P. 1–5. DOI: 10.1109/BlackSeaCom.2018.8433715
2. Signaling is growing 50% faster than data traffic [Online]. – Available at: http://docplayer.net/6278117-Signaling-is-growing-50-faster-than-data-traffic.html
3. Future mobile core network for efficient service operation / [T. Shimojo, Y. Takano, A. Khan et al.] // 1st IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft). – London, UK, 2015. – P. 1–6. DOI: 10.1109/NETSOFT.2015.7116190
4. Reshaping the mobile core network via function decomposition and network slicing for the 5G Era / [M. R. Sama, X. An, Q. Wei, S. Beke] // 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference

© Суліма С. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-1

Workshops (WCNCW). – Doha, Qatar, 2016. – P. 90–96. DOI: 10.1109/WCNCW.2016.7552681
5. Liquid Core [Online]. – Available at: http://networks.nokia.com/portfolio/liquidnet/liquidcore.
6. Globa L. Method for resource allocation of virtualized network functions in hybrid environment / L. Globa, M. Skulysh, S. Sulima // 2016 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 6–9 June 2016 : conference proceedings. – Varna, Bulgaria, 2016. – P. 1–5. DOI: 10.1109/BlackSeaCom.2016.7901546
7. Network Functions Virtualisation [Online]. – Available at: https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf
8. Monitoring and abstraction for networked clouds / [M. Scharf, T. Voith, W. Roome et al.] // 2012 16th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks (ICIN). – Berlin, Germany, 2012. – P. 80–85. DOI: 10.1109/ICIN.2012.6376038
9. Shimojo T. Cost-efficient method for managing network slices in a multi-service 5G core network / T. Shimojo, M. R. Sama, A. Khan, S. Iwashina // Proceedings of the 2017 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM). – Lisbon, Portugal, 2017. – P. 1121–1126. DOI: 10.23919/INM.2017.7987451
10. Network slicing with flexible mobility and QoS/QoE support for 5G Networks / [F. Z. Yousaf, M. Gramaglia, V. Friderikos et al.] // 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). – Paris, France, 2017.– P. 1195–1201. DOI: 10.1109/ICCW.2017.7962821
11. Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges / [J. Ordonez-Lucena, P. Ameigeiras, D. Lopez et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2017. – Vol. 55, № 5. – P. 80–87. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600935

Received 31.01.2019.
Accepted 27.03.2019.

УДК 621.391+004.7

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СЛАЙСОВ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ БАЗОВОЙ СЕТИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Сулима С. В. – ассистент кафедры информационно-телекоммуникационных сетей Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. С ростом объема трафика мобильных данных и числа сервисов, предоставляемых мобильной сетью, растут и потоки служебной нагрузки, что вызывает потребность в изменении принципов, моделей и методов организации обслуживания телекоммуникационных потоков с целью обеспечения заданного качества предоставления широкого спектра услуг гибким и экономически эффективным способом. Преимуществ масштабируемости и эластичности с поддержкой высокого показателя коэффициента использования технических ресурсов сети можно достичь с использованием технологий виртуализации и концепции сетевого слайсинга, что позволяет разворачивать выделенные виртуальные сети на основе сервисов, применяя методы виртуализации сетевых функций. В этом контексте основным остается вопрос, какое количество сетевых слайсов будет целесообразным с точки зрения затрат на управление слайсами и обеспечения нужной функциональности.

Цель. Повышение эффективности работы мобильной сети с помощью оптимального формирования слайсов мультсервисной сети связи.

Метод. Анализ публикаций, посвященных виртуализации сетевых функций, позволил выявить подход к организации использования ресурсов мультисервисной мобильной сети, а также показал недостаточную эффективность существующих решений по важным вопросам этого процесса (производительности алгоритма формирования слайсов, уровня функциональных расходов).

Результаты. Предлагается метод моделирования системы распределения ресурсов сети, предусматривающий формирование сетевых выделенных слайсов, которые обслуживают определенные виды сервисов независимо на совместной инфраструктуре.

Выводы. В статье решена задача построения метода формирования слайсов мультсервисной базовой сети мобильной связи, который благодаря эффективной динамической настройке конфигурации работы системы, позволяет обеспечить предоставление широкого круга сервисов с заданными показателями качества. Построено модель системы организации ресурсов, с помощью которой представлен метод, учитывающий затраты, связанные с избыточным выделением ресурсов, а также уменьшающим количество перерасчетов конфигурации сети, что позволяет достигать оптимального соотношения затрат на управление и итоговое значение качества обслуживания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Network Functions Virtualization, управление ресурсами, сетевой слайсинг, выделенная сеть, Evolved Packet Core.

© Суліма С. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-1

UDC 621.391+004.7

METHOD FOR FORMING OF MULTISERVICE CORE MOBILE COMMUNICATION NETWORK SLICES

Sulima S. V. – Assistant of Department of Information and Telecommunication Networks, National University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. With the growth in the volume of mobile data traffic and the number of services provided by the mobile network, service load flows are also increasing, which necessitates changing the principles, models and methods of telecommunication flows serving in order to ensure the given quality of providing a wide range of services in flexible and cost-effective way. Advantages of scalability and elasticity with the support of a high rate of network technical resources utilization can be achieved using virtualization technologies and the concept of network slicing, that allows deploying dedicated virtual networks based on services, using the methods of network functions virtualization. In this context, the main question remains what number of network slices will be feasible in terms of the cost of slice managing and providing the required functionality.

Objective. To improve the efficiency of mobile network through optimal slice forming in multiservice telecommunication network.

Method. Analysis of the publications devoted to network functions virtualization has shown the organization approach of using the multiservice mobile network resources, and also showed insufficient efficiency of existing solutions on important issues of this process (the performance of the slices formation algorithm, the level of functional costs).

Results. A method to model network resource allocation system, which forms dedicated network slices that serve certain types of services independently on the common infrastructure.

Conclusions. The article solves the problem of constructing a method for forming multiservice core mobile communication network slices, which, due to the effective dynamic configuration of the system, allows providing a wide range of services with a given quality indicators. A model of resource management system is constructed, which is used to present a method that takes into account costs associated with excessive resource allocation, and also reduces the number of network configuration recalculations, which allows achieving a rational ratio of management costs and Quality of Service.

KEYWORDS: Network Functions Virtualization, resource provisioning, network slicing, dedicated network, Evolved Packet Core.

REFERENCES

1. Globa L. Kurdecha V., Ishchenko I., Zakharchuk A., Kunieva N. The Intellectual IoT-System for Monitoring the Base Station Quality of Service, *2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 4–7 June 2018 : conference proceedings.* Batumi, Georgia, 2018, pp. 1–5 DOI: 10.1109/BlackSeaCom.2018.8433715
2. Signaling is growing 50% faster than data traffic [Online]. Available at: http://docplayer.net/6278117-Signaling-is-growing-50-faster-than-data-traffic.html
3. Shimojo T. Takano Y., Khan A., Kaptchouang S., Tamura M., Iwashina S. Future mobile core network for efficient service operation, *1st IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft).* London, UK, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/NETSOFT.2015.7116190
4. Sama R. M., An X., Wei Q., Beker S. Reshaping the mobile core network via function decomposition and network slicing for the 5G Era, *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. Doha, Qatar, 2016, pp. 90–96. DOI: 10.1109/WCNCW.2016.7552681
5. Liquid Core [Online]. Available at: http://networks.nokia.com/portfolio/liquidnet/liquidcore.
6. Globa L., Skulysh M., Sulima S. Method for resource allocation of virtualized network functions in hybrid environment, *2016 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 6–9 June 2016 : conference proceedings*. Varna, Bulgaria, 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/BlackSeaCom.2016.7901546
7. Network Functions Virtualisation [Online]. – Available at: https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf
8. Scharf M. Voith T., Roome W., Gaglianello B., Steiner M., Hilt V., and Gurbani V. Monitoring and abstraction for networked clouds, *2012 16th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks (ICIN).* Berlin, Germany, 2012, pp. 80–85. DOI: 10.1109/ICIN.2012.6376038
9. Shimojo T., Sama M. R., Khan A., Iwashina S. Cost-efficient method for managing network slices in a multi-service 5G core network, *Proceedings of the 2017 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM).* Lisbon, Portugal, 2017, pp. 1121–1126. DOI: 10.23919/INM.2017.7987451
10. Yousaf F. Z. Gramaglia M., Friderikos V., Gajic B. et al. Network slicing with flexible mobility and QoS/QoE support for 5G Networks, *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Paris, France, 2017, pp. 1195–1201. DOI: 10.1109/ICCW.2017.7962821
11. Ordonez-Lucena J. Ameigeiras P., Lopez D., Ramos-Munoz J. J. et al. Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges, *IEEE Communications Magazine,* 2017, Vol. 55, No. 5, pp. 80–87. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600935

© Суліма С. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-1

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

УДК 621.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКА В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ «POLYSWITCH»

Тонкошкур А. С. – д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры электронных вычислительных машин, Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара, Украина.

Накашидзе Л. В. – канд. техн. наук, старш. научн. сотр., директор НИИ энергетики Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Решение задачи повышения надежности солнечных батарей, включая устранение нештатных (пожароопасных) ситуаций на основе разработки методов и средств предотвращения токовых перегрузок в их фотоэлектрических системах.

Цель. Изучение перспективы минимизации токовых перегрузок в фотоэлектрических системах солнечных батарей путем применения недорогостоящих элементов функциональной электроники, в частности, относительно новых и, получивших широкое распространение, самовосстанавливающихся предохранителей типа «Polyswith».

Метод. Предложено схемное решение и методом моделирования обоснованы возможности использования предохранителей типа Polyswitch для предотвращения и минимизации токовых перегрузок в фотоэлектрических системах солнечных батарей.

Результаты. Проанализировано влияние величины сопротивления в проводящем состоянии и тока срабатывания предохранителей на вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики параллельных соединений фотоэлектрических преобразователей и их модулей.

Выводы. Показано, что эффективное ограничение тока при наличии короткого замыкания при таком соединении фотоэлектрических компонент может быть реализовано при выполнении следующих условий:

– сопротивление предохранителя в проводящем состоянии значительно меньше параллельного соединения последовательных сопротивлений фотоэлектрических компонент;

– ток срабатывания предохранителя должен быть больше тока короткого замыкания отдельного фотоэлектрического компонента и меньше тока их параллельного соединения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фотоэлектрический преобразователь, токовые перегрузки, самовосстанавливающиеся предохранители, вольт-амперные характеристики, вольт-ваттные характеристики, моделирование.

АББРЕВИАТУРЫ

ВАХ – вольт-амперные характеристики;

ВВХ – вольт-ваттные характеристики;

СВП – самовосстанавливающиеся предохранители;

ФЭМ – фотоэлектрический модуль;

ФЭП – фотоэлектрический преобразователь.

НОМЕНКЛАТУРА

A – диодный коэффициент;

Fu – самовосстанавливающийся предохранитель;

I – ток, отдаваемый во внешнюю электрическую цепь;

i_0 – обратный ток диода;

I_{Fu} – ток СВП в проводящем состоянии;

I_L – ток резистора нагрузки;

i_{ph} – величина фототока ФЭП;

i_{sc} – ток короткого замыкания ФЭП;

I_{sc} – ток короткого замыкания ФЭМ;

I_{trip} – ток срабатывания (перехода в изолирующее – состояние) СВП;

k – постоянная Больцмана;

m – число последовательно соединенных ФЭП в модуле;

n – число параллельно соединенных ФЭМ в фотоэлектрической системе;

PV – фотоэлектрический компонент;

q – заряд электрона;

$R_{1\max}$ – минимальное сопротивление СВП после одного часа восстановления при заданной температуре окружающего воздуха;

R_{Fu} – сопротивление СВП в проводящем состоянии;

r_L – сопротивление нагрузки;

R_L – резистор нагрузки;

Rmin – максимально возможное минимальное начальное сопротивление СВП;

r_s – последовательное сопротивление ФЭП;

R_s – эквивалентное последовательное сопротивление ФЭМ;

r_{sh} – шунтовое сопротивление ФЭП;

U_T – эквивалентное термальное напряжение;

V – выходное напряжение;

V_{oc} – напряжение холостого хода;

T – абсолютная температура;

v – выходное напряжение ФЭП.

© Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-2

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее нежелательных источников ненадежности фотоэлектрических компонентов солнечных батарей являются токовые перегрузки и возникновение перегревов, включая замыкания непосредственно в них, а также короткие замыкания между их соединительными контактами [1–3]. Физическими причинами таких ситуаций могут быть повреждения коррозией в процессе эксплуатации составляющих их элементов, «скрытые» производственные дефекты, неисправные блокирующие и обводные диоды или результаты деградации изоляции под действием окружающей среды [2].

Особое значение это имеет для ФЭМ на основе тонкопленочного кремния, где имеет место образование шунтов как «скрытых» дефектов при производстве, так и из-за обратного смещения ячеек, вызванного затенением модулей или отдельных ФЭП солнечной батареи в процессе ее эксплуатации. Это усугубляется тем, что для тонкопленочных модулей превентивные меры с использованием обводных диодов могут быть невозможными для ограничения обратного напряжения на неактивных ФЭП [1].

Наиболее неблагоприятные последствия возникновения указанных коротких замыканий имеют место в параллельных соединениях фотоэлектрических элементов. В этом случае они приводят к выходу из строя всего соединения и возникновению существенных перегревов из-за значительных токов, создаваемых суммированием токов отдельных таких элементов. В итоге это может привести к нештатным (пожароопасным) ситуациям. Устранение или минимизация влияния указанного фактора на работу солнечных батарей представляется наиболее необходимым условием для более широкого использования параллельных соединений при формировании модулей и панелей солнечных батарей.

Следует отметить, что в настоящее время разработке методов и средств предотвращения появления локальных перегревов («горячих пятен») в фотоэлектрических компонентах солнечных батарей уделяется значительное внимание. В частности, известны решения такой задачи как: использование ФЭП с низкими напряжениями обратного пробоя [4]; включение в фотоэлектрическую систему дополнительных элементов: обводных диодов и активных обводных переключателей [3, 5–7]; методы и технические средства, основанные на обнаружении «горячего пятна» на основе измерений электрических параметров солнечных панелей в сочетании с активной защитой по способу разомкнутого контура [8, 9].

Тем не менее, они не являются универсальными. Использование ФЭП с низким напряжением обратного пробоя ограничивает мощность, рассеиваемую во время разогрева его локальных областей, но может быть эффективным способом предотвращения «горячего пятна», если величина рассеиваемой мощности недостаточна для повреждения ФЭП.

Имеющиеся на настоящий момент результаты моделирования и экспериментальные данные свидетельствуют, что обводные диоды в подпанельных строках фотоэлектрических элементов не полностью защищают от появления «горячих пятен». Обводные диоды более эффективны для предотвращения «горячих пятен» при очень коротких длинах строк ФЭП, что не применяется в современной конструкции панелей из экономических соображений. Активные обводные переключатели, как и технические средства, основанные на обнаружении «горячих пятен», являются улучшением по сравнению с обводным диодом, но требуют усложнения схемных решений и затрат [5].

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из перспективных направлений решения рассматриваемой задачи является применение для изоляции неактивных (затененных или дефектных) областей как отдельных ФЭП, так и их модулей, менее дорогостоящих элементов функциональной электроники, в частности, относительно новых и, получивших широкое распространение, СВП типа «Polyswith» [3, 10]. Эти элементы электрической и тепловой защиты уже нашли применение в аккумуляторах и гальванических источниках питания [11–14]. Необходимым этапом этого представляется разработка и моделирование функционирования схемных решений для фотоэлектрических компонентов, использующих указанные самовосстанавливающиеся предохранители.

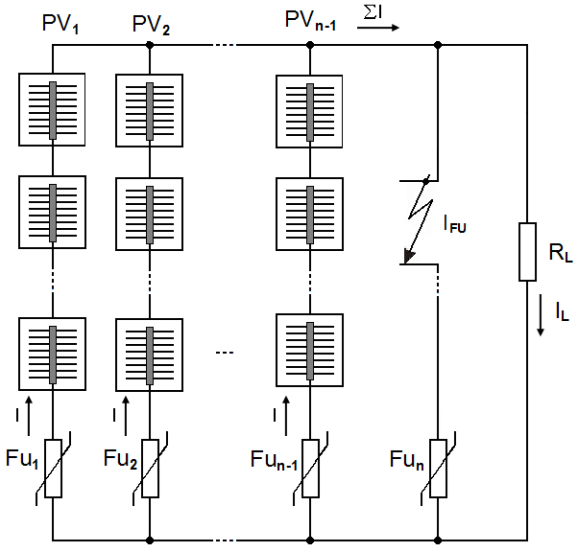
В данной работе предложена модель и проанализированы возможности использования самовосстанавливающихся предохранителей типа Polyswitch для предотвращения и минимизации токовых перегрузок в параллельных соединениях фотоэлектрических преобразователей и их модулей.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Как уже указывалось, короткие замыкания являются наиболее нежелательными в параллельных соединениях как ФЭП та их последовательных соединений ФЭМ. Из рис. 1 видно, что короткое замыкание одного компонента PV_n в отсутствие СВП ведет к потере всей параллельной цепи, содержащей другие исправные компоненты.

Наличие самовосстанавливающихся предохранителей Fu_i, соединенных последовательно с каждым фотогенерирующим компонентом PV_i, позволяет сохранить и эксплуатировать исправные при наличии короткого замыкания в одном из них. Математическая модель, позволяющая проанализировать рассматриваемый эффект ограничения тока при коротком замыкании и определить наиболее эффективные режимы такой защиты, включает в себя решение задачи выбора эквивалентных схем, описывающих ФЭП и ФЭМ, аппроксимации полевой зависимости электрического сопротивления СВП, а также формулировку и решение основных уравнений рассматриваемой модели для определения их вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик.

© Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-2



I_L, I_{Fu} и I – ток резистора нагрузки R_L, ток коротко замкнутого компонента и токи, генерируемые PV_i.

Рисунок 1 – Упрощенная схема, иллюстрирующая защиту от короткого замыкания в параллельном соединении фотоэлектрических компонентов PV_i (i=1, 2, … n–1) с использованием самовосстанавливающихся предохранителей Fu_i (i=1, 2, … n)

ФЭП обладают нелинейными вольт-амперными характеристиками, которые зависят от уровня солнечной радиации, температуры окружающей среды и особенностей самой ячейки.

В настоящее время известно несколько основных схем замещения ФЭП, математическое описание которых используется в современном моделировании [15–17]. Наиболее известная из них, содержит источник фототока (i_{ph}), параллельно включенный диод (D), который моделирует p-n-переход, шунтовое сопротивление (r_{sh}), моделирующее токи утечки, и последовательное сопротивление (r_s), которое характеризует внутреннее сопротивление элемента и контактов. В рабочем режиме ФЭП (прямосмещенный фотодиод) током утечки пренебрегают, т.е. принимают, что r_{sh} стремится к бесконечности и эквивалентная схема замещения ФЭП имеет вид, показанный на рис. 2.

В соответствии с этой схемой замещения выходной ток фотоэлемента i может быть определен [15, 16] из выражения

$$i = i_{ph} - i_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(v + ir_s)}{AkT} \right] - 1 \right\}, \qquad (1)$$

где A – коэффициент, зависящий от физических свойств материалов и параметров p-n-перехода (для кремния принимается равным 1,2…1,8 соответственно с [15, 18]).

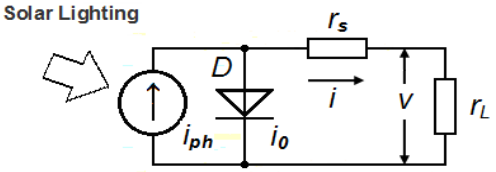


Рисунок 2 – Упрощенная эквивалентная схема замещения ФЭП

© Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-2

Как уже говорилось выше, при последовательном, параллельном или комбинированном соединении фотоэлектрических элементов образуются ФЭМ. Для определения эквивалентных ВАХ таких соединений используются различные формы их представления [15, 19–23].

Для построения рассматриваемой модели, соответствующей параллельному соединению n ФЭМ (каждый из которых является последовательное соединением m ФЭП) представляется наиболее подходящим известное выражение, непосредственно базирующееся на формуле (1) [15, 20–22]

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - \exp\left[\frac{V - V_{oc} + IR_s}{U_T} \right] \right\}, \qquad (2)$$

где $I_{sc} = n \cdot i_{sc}$ – ток короткого замыкания фотоэлектрического модуля; $i_{sc} = i\,(v = 0) = i_{ph}$ – ток короткого замыкания ФЭП (наибольший ток, производимый ФЭП при условии замыкания его контактов); $U_T = (AkT/q) \cdot m$ – эквивалентное термальное напряжение модуля; $V_{oc} = m \cdot v_{oc}$ – напряжение холостого хода модуля, $v_{oc} = v(i = 0) = (AkT/q)\ln[(i_{ph} + i_0)/i_0]$ – напряжение холостого хода ФЭП (падение напряжения на p-n-переходе, которое создает фототоком (i_{ph}), если ток во внешней цепи (i) равен нулю; $R_s = r_s \cdot m/n$ – эквивалентное последовательное сопротивление модуля.

Самовосстанавливающиеся предохранители «Polyswith» имеют температурную зависимость сопротивления R_{Fu}, возрастающую с ростом температуры, которая имеет три характерных участка. При относительно небольших значениях температуры (участок 1) имеет место плавное повышение их сопротивления от температуры. В узком диапазоне температуры около 125ºС наблюдается резкий рост (на несколько порядков) сопротивления СВП (участок 2). При дальнейшем увеличении температуры зависимость сопротивления этих устройств от температуры также имеет плавный возрастающий характер (участок 3) [11].

Физический механизм причины такой скачкообразной зависимости определяется структурными особенностями основного функционального материала СВП, который представляет собой нанокомпозит с непроводящей полимерной матрицей и высокопроводящим наноуглеродным наполнителем. Благодаря углеродным каналам в неразогретом состоянии (участок 1) нанокомпозит является проводником с низким собственным сопротивлением.

При разогреве выше определенной температуры (температуры перехода) углеродные каналы разрываются за счет объемного расширения полимерной матрицы и/или трансформации кристаллической структуры матрицы в аморфную и электрическое сопротивление нанокомпозита резко возрастает (участок 2) [11–12]. На высоко-температурном участке 3 структура проводящих каналов полностью разрушена и сопротивление СВП достигает максимальной величины.

Техническое применение имеют участок 1 (высокопроводящее состояние) и 2 (скачкообразный переход к низкопроводящему состоянию).

В качестве основных параметров, важных для их применения в схеме рис. 1, следует принять:

R_{Fu0} – сопротивление СВП в проводящем состоянии (определяется паспортными величинами $R_{\min}$ – максимальное минимальное начальное сопротивление или $R_{1\max,}$ – минимальное сопротивление после одного часа восстановления при заданной температуре окружающего воздуха); I_{trip} – ток срабатывания СВП, т.е. минимальный ток через СВП, при котором происходит переход от проводящего состояния к непроводящему.

Защита параллельного соединения фотоэлектрических компонентов солнечных батарей (рис. 1) может быть реализована при выполнении следующих условий

$$R_{Fu0}=R_{\min} \text{ (или } R_{1\max}) << m\, R^*_s \qquad (3)$$

где $R^*_S = r_S$ или $R^*_S = R_S$ в последовательном соединении m ячеек или модулей, соответственно.

То есть наличие таких предохранителей в электрической цепи не должно влиять на нормальную работу фотоэлектрических компонентов.

Второе условие:

$$(n-1)\cdot I^* > I_{irip} > I^*_{SC}\ , \qquad (4)$$

где $I^* = i$, $I^*_{SC} = i_{SC}$ или $I^* = I$, $I^*_{SC} = I_{SC}$ в последовательном соединении m ячеек или модулей, соответственно.

Т.е. ток срабатывания предохранителя PPTC должен быть больше тока короткого замыкания отдельного компонента (отдельного фотоэлектрического модуля или фотоэлемента) и меньше, чем ток их параллельного соединения в рабочем режиме $(n–1)\cdot I^*$, где $(n–1)$ – число исправных ФЭМ или ФЭП. Учитывая характерное для СВП уменьшение тока срабатывания с ростом температуры, следует отметить, что первое из указанных требований должно быть выполнено при максимально возможной температуре функционирования ФЭП (~60…80°С [10]).

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определение аналитических выражений модели может быть произведено на основе уравнений Кирхгофа и известных математических описаниях для ВАХ рассматриваемых фотоэлектрических систем и электрических характеристик используемых электронных приборов. В частности, учет присутствия СВП (рис. 1) может быть произведен заменой в соответствующей эквивалентной схеме и формуле последовательного сопротивления r_s на его сумму с частью сопротивления R_{Fu}, приходящейся на каждый ФЭП в последовательном их соединении, т.е. $\left(R^*_S + R_{Fu}\right)$.

Следует отметить, что в соответствии с базовым принципом использования СВП [10] их сопротивления до срабатывания при повышении температуры пренебрежимо малы в сравнении с последовательным сопротивлением отдельного ФЭМ , и таким образом в нормальном режиме можно принять $R_{Fu0}<<R^*_s$.

Наличие короткого замыкания одного фотоэлектрического компонента в соответствии со схемой рис. 1 может рассматриваться как параллельное соединение сопротивления нагрузки R_L и сопротивления предохранителя $R_{Fu}(I_{Fu})$, зависящего от величины протекающего через него тока I_{Fu}. Следует отметить, что сопротивление нагрузки R_L для упрощения расчетов принималось активным, хотя оно может быть и реактивным (например, емкостным) или, в общем случае, комплексным.

Примем во внимание, что:

$$V = V(I_{Fu}, R_L) = \\ = I(I_{Fu}, R_L)\frac{R_{Fu}(I_{Fu})R_L}{R_{Fu}(I_{Fu}) + R_{L)}}\ , \qquad (5)$$

где $I(I_{Fu},R_L) = I_{Fu}+I_L$ – величина суммарного тока через короткозамкнутый элемент цепи и сопротивление нагрузки.

С учетом (5) уравнение для расчета ВАХ рассматриваемой фотоэлектрической системы (при наличии коротко замкнутого одного из ее модулей) можно получить на основе (2), которое после преобразования (разрешения относительно V) будет иметь следующий вид:

$$V(I_{Fu}, R_L) = U_T\ \ln\left[\frac{I_{SC} - I(I_{Fu}, R_L)}{I_{SC}}\right] - \\ -V_{OC} + I(I_{Fu}, R_S)R_S\ , \qquad (6)$$

где

$$I(I_{Fu}, R_L) = I_{Fu}\left[1 + \frac{R_{Fu}(I_{Fu})}{R_L}\right].$$

При определении параметров U_T, I_{SC}, V_{OC}, и R_S надо заменить величину m (число ФЭМ соединенных параллельно на схеме рис. 1) на $(m–1)$.

ВАХ самовосстанавливающегося предохранителя, как и любого позисторного элемента представляется N-образной зависимостью и может быть определена в параметрической форме, где в качестве такого параметра используется температура его нагрева [24, 25]. Однако, использование таких представлений существенно усложняет рассматриваемую задачу. Для ее упрощения, допускающего получение понятного адекватного результата, представляется возможным использовать представления о скачкообразном изменении сопротивления рассматриваемых СВП в области токов в окрестности тока срабатывания I_{trip}. Таким образом, можно принять, что зависимость $R_{Fu}(I_{Fu})$ имеет вид переключательной функции, которую можно аппроксимировать функцией вида:

© Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-2

$$R_{Fu}(I_{Fu}) = \begin{cases} R_{Fu0}, \text{если } I_{Fu} < I_{Fu0} \\ R_{Fu0}\left(\dfrac{I_{Fu}}{I_{Fu0}}\right)^{\alpha}, \text{если } I_{Fu} < I \end{cases}, \qquad (7)$$

где $R_{Fu0} = R_{\min}$ (или $R_{1\max}$); $I_{Fu} = I_{trip}$.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Как уже отмечалось, параметрами, определяющими эффективность использования СВП для защиты фотоэлектрических систем от коротких замыканий, являются сопротивление предохранителя в проводящем состоянии R_{Fu} и ток его срабатывания I_{Fu0}.

Таблица 1 – Параметры элементов модели фотоэлектрической системы

Компонент	Параметры	Принятые значения
ФЭП [18]	i_0	1 мкА
	i_{ph}	0,039 А
	r_S	2 Ом
	A	1,8
СМП (из серии RXEF) [26]	R_{Fu0}	0,1–1 Ом
	I_{Fu0}	0,3–1 А
Число ФЭП в их последовательном соединении (в ФЭМ)	m	36
Число параллельных соединений ФЭМ	n	36

Для исследования функционирования рассматриваемых технических средств защиты были проведены численные эксперименты на основе фотоэлектрической системы (рис. 1) с компонентами на основе элементов с типовыми параметрами, приведенными в табл. 1.

Параметр α в формуле (7) принимался равным 25.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние величины сопротивления R_{Fu0} на вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики исследуемой фотоэлектрической системы показано на рис. 3 и рис. 4.

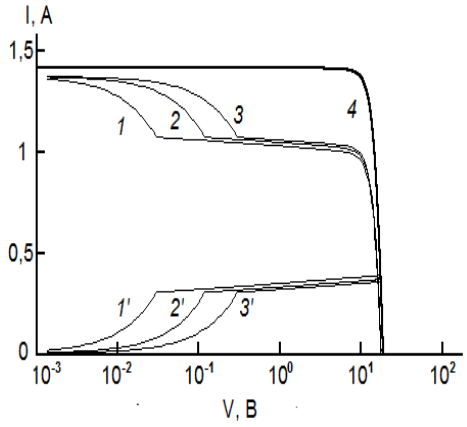


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики $I_L(V)$ (кривые 1–4) и зависимости тока через СВП $\mathrm{Fu_n}$ $I_{Fu}(V)$ (1′–3′) моделируемой фотоэлектрической системы при наличии короткого замыкания одного из ее компонентов
Параметры СВП I_{Fu0} = 0,3 А и R_{Fu0}, Ом: 1 – 0,1; 2 – 0,4; 3 – 1. Кривые 4 соответствует отсутствию короткого замыкания

© Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-2

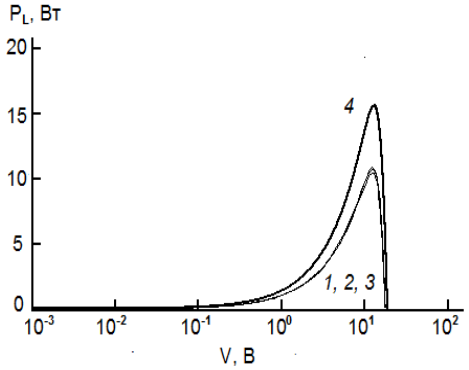
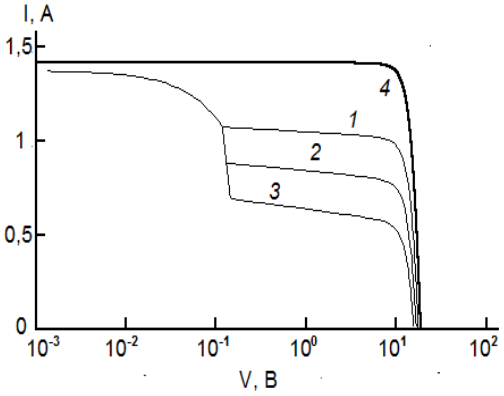
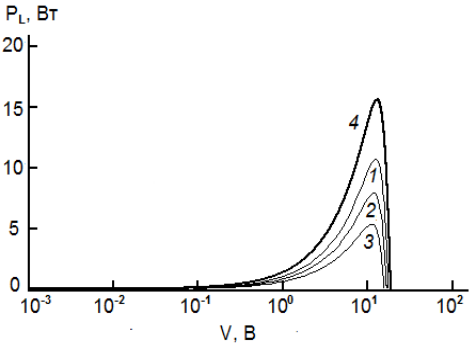


Рисунок 4 – Вольт-ваттные характеристики $P_L(V)$ моделируемой фотоэлектрической системы при наличии короткого замыкания одного из ее компонентов. Параметры и обозначения соответствуют принятым на рис. 3

Влияние величины тока срабатывания СВП на аналогичные характеристики рассматриваемой фотоэлектрической системы приведены на рис. 5.



а



б

Параметры СВП R_{Fu0} = 0,4 Ом и I_{Fu0}, А: 1 – 0,3; 2 – 0,5; 3 – 0,7. Кривые 4 соответствует отсутствию короткого замыкания

Рисунок 5 – Вольт-амперные (а) и вольт-ваттные (б) характеристики моделируемой фотоэлектрической системы при коротком замыкания одного из ее компонентов

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из рис. 3, влияние сопротивления СВП в проводящем состоянии R_{Fu0} имеет место в диапазоне очень малых напряжений V. Оно ограничивает его начальный участок, где сопротивление нагрузки R_L меньше R_{Fu0} и практически отсутствует отбор тока с

нагрузки на предохранитель. С уменьшением сопротивления R_{Fu0} этот участок сокращается.

При более высоких значениях R_L ток через СВП увеличивается, что приводит в итоге к его срабатыванию, после чего получается типовая для фотоэлектрических систем зависимость $I_L(V)$, но со значением тока короткого замыкания уменьшенным на величину, которая представляет собой сумму токов отключенного (короткозамкнутого) последовательного соединения ФЭП (PV_n) и тока срабатывания предохранителя Fu_n.

Наличие СВП приводит только к определенному снижению производимой фотоэлектрической системой электрической мощности, а не полному ее выходу из строя (рис. 4). Изменение сопротивления предохранителя в проводящем состоянии практически не влияет на ВВХ

Как свидетельствуют эти данные рис. 5а и рис. 5б, изменения величины тока срабатывания предохранителя определяют изменения максимального тока и производимой электрической мощности в рабочем диапазоне, где реализуется защита от короткого замыкания, т.е. СВП находится в состоянии с высоким значением сопротивления. Уменьшение величины I_{Fu0} снижает энергетические затраты на поддержание предохранителя в низкопроводящем состоянии, блокирующем короткое замыкание компонента параллельной цепи. В итоге, это приводит к росту тока нагрузки I_L и мощности P_L, т. е. повышению эффективности работы всей фотоэлектрической системы. Основным ограничением снизу при определении тока срабатывания СВП является требование отсутствия какого-либо влияния предохранителя на нормально функционирующий (в отсутствии его коротких замыканий рассматриваемого вида) фотоэлектрический компонент (ФЭМ или ФЭП), т.е. $I_{Fu0}>I_{SC}$.

Следует также отметить, что потери производимой электрической энергии на работу предохранителя в рассматриваемой ситуации короткого замыкания одного из параллельно соединенных фотоэлектрических компонентов могут быть и меньшими, чем получены в рамках рассматриваемой модели, базирующейся на аппроксимации характеристики СВП переключательной функцией, которая не учитывает, что при увеличении падения напряжения на предохранителе его ток может уменьшается.

ВЫВОДЫ

Предложено схемное решение ограничения тока в фотоэлектрических системах солнечных батарей с использованием самовосстанавливающихся предохранителей «Polyswitch».

Разработана математическая модель схемного решения и проведено моделирование его основных характеристик при использовании типичных параметров фотоэлектрических преобразователей на основе монокристаллического кремния и коммерческих самовосстанавливающихся предохранителей. Проанализировано влияние величины сопротивления в проводящем состоянии и тока срабатывания СВП на ВАХ и ВВХ параллельного соединения фотоэлектрических компонентов солнечных батарей.

Показано, что эффективное ограничение тока при наличии короткого замыкания в параллельном соединении фотоэлектрических компонент может быть реализовано при выполнении следующих условий:

– сопротивление предохранителя в проводящем состоянии значительно меньше параллельного соединения последовательных сопротивлений фотоэлектрических компонент;

– ток срабатывания предохранителя должен быть больше тока короткого замыкания отдельного фотоэлектрического компонента и меньше тока их параллельного соединения.

© Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-2

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Köntges M. Review of failures of photovoltaic modules. IEA PVPS Task 13 / [M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard et al.], 2014. – 132 p.
2. United Solar Technologies – Солнечные модули и батареи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ust.su/solar/media/section-inner17.
3. Tonkoshkur A. S. Schemotechnical technologies for reliability of solar arrays / A. S. Tonkoshkur, L. V. Nakashidze, S. F. Lyagushyn // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Вип. 4′(117) – Дніпро, 2018. – С. 95–107.
4. Kim K. A. Photovoltaic hot spot analysis for cells with various reverse-bias characteristics through electrical and thermal simulation / K. A. Kim, P. T. Krein // Proc. IEEE Workshop Control Modeling Power Electron. – June. – 2013. – P. 1–8.
5. Kim K. A. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. / K. A. Kim, P. T. Krein // IEEE J. Photovoltaics 2015. – 5 (5). – P. 1435–1441.
6. Acciari G. Higher PV module efficiency by a novel CBS bypass / G. Acciari, D. Graci, A. L. Scala // IEEE Trans. Power Electron. – May 2011. – Vol. 26, No. 5. – P. 1333–1336.
7. d'Alessandro V. A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules / V. d'Alessandro, P. Guerriero, S. Daliento // IEEE J. Photovoltaics. – Jan. 2014. – Vol. 4, No. 1. – P. 405–413.
8. Pacheco Sánchez F. J. Photovoltaic systems distributed monitoring for performance optimization. Doct. Thesis, Universidad de Málaga (RIUMA: riuma.uma.es) / F. J. Sánchez Pacheco. – Málaga, España, 2015.
9. Single panel voltage zeroing system for safe access on PV plants. / [F. Di Napoli, G. Guerriero, V. d'Alessandro, S. Daliento] // IEEE J. Photovoltaics. – 2015. – Vol. 5 (5). – P. 1428–1434.
10. Применение самовосстанавливающихся элементов для электрической защиты солнечных батарей / [А. С. Тонкошкур, А. В. Иванченко, Л. В. Накашидзе, С. В. Мазурик] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2018. – № 1. – С. 43–49.
11. Гавриков В. Самовосстанавливающиеся PTC-предохранители для защиты от токовых перегрузок / В. Гавриков // Новости Электроники. – 2014. – № 12. – С. 11–15.

12. Каминская Т. П. Самовосстанавливающиеся предохранители для автомобильной электроники / Т. П. Каминская, К. И. Домкин // Электронные компоненты. – 2008. – № 5. – С. 80–82.
13. Pat. 6608470 USA. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries / J. W. Oglesbee, A. G. Burns. – 19.08.03.
14. Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries [Electronic resource]: Littelfuse, Inc. – 2017.– Available at: http://www.littelfuse.com/~/media/ electronics /application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion _and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf.pdf
15. Левшов А. В. О математическом моделировании фотоэлектрических модулей / А. В. Левшов, А. Ю. Федоров // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – №1(14)’ – 2013. – С. 153–158.
16. Раушенбах Г. «Справочник по проектированию солнечных батарей» / Г. Раушенбах. – М. : Энергоатомиздат, – 1983. – 360 с.
17. Lorenzo E. Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems / E. Lorenzo // Artes Graficas Gala. – Spain, 1994.
18. Коваль О. С. Определение параметров солнечного элемента из его световой вольт-амперной характеристики / О. С. Коваль, М. С. Тиванов // Вестник БГУ. – 2012. – Сер. 1. – № 2. – С. 39–44.
19. Salem F. A. Modeling and Simulation issues on Photo-Voltaic systems, for Mechatronics design of solar electric applications / F. A.Salem // International Journal of Mechanical Engineering (IIJME). – August 2014. – Vol. 2, Issue 8. – P. 24–7. http://www.ipasj.org/IIJME/IIJME.htm
20. Alboteanu I. L. Modelling and simulation of a stand-alone photovoltaic system / I. L. Alboteanu, S. Ivanov, G. Manolea // 8th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PS 2008), Santander, Cantabria, Spain, 2008. – September 23–25. – P. 189–194.
21. Models for a Stand-Alone PV System / [A. D. Hansen, P. Sorensen, L. H. Hansen , H. Binder]. – Roskidle, 2000. – 78 p.
22. Гаевский А. Ю. Определение параметров фотоэлектрических модулей на основе точного решения уравнения для ВАХ / А. Ю. Гаевский // Відновлювальна енергетика. – 2012. – № 4. – С. 32–39
23. Honsberg C. Arisone State University. Solar Power Labs [Electr. Resource] / C. Honsberg, S. Bowden. – Available at: http://www.pveducation.org/pvcdrom
24. Мэклин Э. Д. Терморезисторы / Э. Д. Мэклин. – М. : Радио и связь, 1983. – 208 с.
25. Тонкошкур О. С. Компонентна база РЕА / О. С. Тонкошкур, О. Н. Тристан, О. М. С’янов. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2004. – 240 с.
26. PolySwitch™ Resettable Device Short Form Catalog. May. – 2005. Tuco Electronics. Raychem circuit protection. [Electr. Resource]. – Available at: https://datasheet.octopart.com/MICROSMD010F-2-Tyco-Electronics-datasheet-45906.pdf

Received 07.11.2018.
Accepted 14.03.2019.

УДК 621.31

МОДЕЛЮВАННЯ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМУ В ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ САМОВІДНОВЛЮВАНОГО ЗАПОБІЖНИКА «POLYSWITCH»

Тонкошкур О. С. – д-р фіз-мат. наук. професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна.

Накашидзе Л. В. – канд. техн. наук, старш. наук. співр., директор НДІ енергетики Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Рішення завдання підвищення надійності сонячних батарей, включаючи усунення нештатних (пожежонебезпечних) ситуацій, на основі розробки методів і засобів запобігання струмових перевантажень в їх фотоелектричних системах.

Мета. Вивчення перспективи мінімізації струмових перевантажень у фотоелектричних системах сонячних батарей шляхом застосування недорогих елементів функціональної електроніки, зокрема відносно нових і тих, що набули широкого поширення, самовідновлюваних запобіжників типу «Polyswith».

Метод. Запропоновано схемне рішення і методом моделювання обґрунтовані можливості використання запобіжників типу Polyswitch для запобігання та мінімізації струмових перевантажень у фотоелектричних системах сонячних батарей.

Результати. Проаналізовано вплив величини опору в провідному стані та струму спрацьовування запобіжників на вольт-амперні та вольт-ватні характеристики паралельних з’єднань фотоелектричних перетворювачів і їх модулів.

Висновки. Показано, що ефективне обмеження струму за наявності короткого замикання при такому з’єднанні фотоелектричних компонент може бути реалізовано при виконанні таких умов:

– опір запобіжника в провідному стані значно менше послідовного опору фотоелектричного компонента;

– струм спрацьовування запобіжника повинен бути більшим струму короткого замикання окремого фотоелектричного компонента і меншим струму їх паралельного з’єднання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: фотоелектричний перетворювач, струмові перевантаження, самовідновлюваний запобіжник, вольт-амперні характеристики, вольт-ватні характеристики, моделювання.

UDC 621.31

MODELING OF CURRENT LIMITATIONS IN PHOTO-ELECTRICAL SYSTEMS OF SOLAR BATTERIES USING SELF-RESTORING FUSES POLYSWITCH

Tonkoshkur A. S. – Doctor of Phys. Mat. Sciences, Professor, Professor of the Department of Electronic Computers, Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine.

Nakashidze L. V. – PhD, Senior Scientific Reseacher, Director of Energy Research Institute, Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine.

© Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-2

ABSTRACT

Context. Solving the problem of increasing the reliability of solar cells, including the elimination of abnormal (fire hazardous) situations based on the development of methods and means to prevent current overloads in their photovoltaic systems.

Objective. The study of the prospects of minimizing current overloads in photovoltaic systems of solar cells through the use of low-cost elements of functional electronics in particular rather new and widely used self-healing fuses of the type "Polyswith".

Method. A circuit design is proposed and the modeling method makes it possible to use Polyswitch-type fuses to prevent and minimize current overloads in photovoltaic solar panels.

Results. The influence of the magnitude of the resistance in the conducting state and the current of operation of the fuses on the current-voltage and voltage-watt characteristics of parallel connections of photoelectric converters and their modules is analyzed.

Conclusions. It is shown that an effective current limitation in the presence of short-circuits with such a connection of photovoltaic components can be realized under the following conditions:

– the resistance of the fuse in the conducting state is much less than the consistent resistance of the photoelectric component;

– the current of the fuse should be greater current of short circuit of a separate photoelectric component and less current of their parallel connection.

KEYWORDS: photoelectric converter, overcurrent, self-resetting fuses, current-voltage characteristics, voltage-watt characteristics, simulation.

REFERENCES

1. Köntges M., Kurtz S., Packard C., Jahn U., Berger K. A., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M. Review of failures of photovoltaic modules. IEA PVPS Task 13, 2014, 132 p.
2. United Solar Technologies – Solnechnye moduli i batarei [Electronic resource]. Available at: http://ust.su/solar/media/section-inner17.
3. Tonkoshkur A. S., Nakashidze L. V., Lyagushyn S. F. Schemotechnical technologies for reliability of solar arrays, Sistemni texnologiï. Regional'nij mizhvuzivs'kij zbirnik naukovix prac', Vip. 4′(117). Dnipro, 2018, pp. 95–107.
4. Kim K. A., Krein P. T. Photovoltaic hot spot analysis for cells with various reverse-bias characteristics through electrical and thermal simulation, *Proc. IEEE Workshop Control Modeling Power Electron.* June, 2013, pp. 1–8.
5. Kim K. A., Krein P. T. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode, *IEEE J. Photovoltaics*, 5 (5), 2015, pp. 1435–1441.
6. Acciari G., Graci D. , Scala A. L. Higher PV module efficiency by a novel CBS bypass, *IEEE Trans. Power Electron*, May 2011, Vol. 26, No. 5, pp. 1333–1336,.
7. d'Alessandro V., Guerriero P. , Daliento S. A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules, *IEEE J. Photovoltaics,* Jan. 2014, Vol. 4, No. 1, pp. 405–413.
8. Pacheco Sánchez F. J. Photovoltaic systems distributed monitoring for performance optimization. Doct. Thesis, Universidad de Málaga (RIUMA: riuma.uma.es) / F. J. Sánchez Pacheco. Málaga, España, 2015.
9. Di Napoli F., Guerriero G. , d'Alessandro V. , Daliento S. Single panel voltage zeroing system for safe access on PV plants, *IEEE J. Photovoltaics,* 2015, Vol. 5 (5), pp. 1428–1434.
10. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashidze L. V., S. V. Mazurik Primenenie samovosstanavlivajushhihsja jelementov dlja jelektricheskoj zashhity solnechnyh batarej, *Tehnologija i konstruirovanie v jelektronnoj apparature,* 2018, No. 1, pp. 43–49.
11. Gavrikov V. Samovosstanavlivajushhiesja PTC-predohraniteli dlja zashhity ot tokovyh peregruzok, *Novosti Jelektroniki*, 2014, No. 12, pp. 11–15.
12. Kaminskaja T. P., K. I. Domkin Samovosstanavlivajushhiesja predohraniteli dlja avtomobil'noj jelektroniki, *Jelektronnye komponenty*, 2008, No. 5, pp. 80–82.
13. Oglesbee J. W., Burns A. G. Pat. 6608470 USA. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries. 19.08.03.
14. Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries [Electronic resource]: Littelfuse, Inc, 2017, Available at: http://www.littelfuse.com/~/media/ electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf.pdf
15. Levshov A. V., Fjodorov A. Ju. O matematicheskom modelirovanii fotojelektricheskih modulej / A. V. Levshov, // *Naukovi praci DonNTU. Serija: «Elektrotehnika i energetyka»,* No. 1(14)', 2013, pp. 153–158.
16. Raushenbah G. «Spravochnik po proektirovaniju solnechnyh batarej». Moscow, Jenergoatomizdat, 1983, 360 p.
17. Lorenzo E. Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems, Artes Graficas Gala, Spain, 1994.
18. Koval' O. S., Tivanov M. S. Opredelenie parametrov solnechnogo elementa iz ego svetovoj vol't-ampernoj harakteristiki, *Vestnik BGU,* 2012, Ser. 1, No. 2, pp. 39–44.
19. Salem F. A. Modeling and Simulation issues on Photo-Voltaic systems, for Mechatronics design of solar electric applications, *International Journal of Mechanical Engineering (IIJME).* August 2014, Vol. 2, Issue 8, pp. 24–7. http://www.ipasj.org/IIJME/IIJME.htm
20. Alboteanu I. L., Ivanov S., Manolea G. Modelling and simulation of a stand-alone photovoltaic system, *8th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PS 2008),* Santander, Cantabria, Spain, 2008, September 23–25, pp. 189–194.
21. Hansen A. D., Sorensen P., Hansen L. H., Binder H. Models for a Stand-Alone PV System. Roskidle, 2000, 78 p.
22. Gaevskij A. Ju. Opredelenie parametrov fotojelektricheskih modulej na osnove tochnogo reshenija uravnenija dlja VAH, *Vidnovljuval'na energetik,* 2012, No. 4, pp. 32–39.
23. Honsberg C., Bowden S. Arisone State University. Solar Power Labs [Electr. Resource], Available at: http://www.pveducation.org/pvcdrom
24. Mjeklin Je. D. Termorezistory. Moscow, Radio i svjaz', 1983, 208 p.
25. Tonkoshkur O. S., Trystan O. N. , S'janov O. M. Komponentna baza REA. Dniprodzerzhyns'k, DDTU, 2004, 240 p.
26. PolySwitch™ Resettable Device Short Form Catalog. May, 2005. Tuco Electronics. Raychem circuit protection. [Electr. Resource]. Available at: https://datasheet.octopart.com/MICROSMD010F-2-Tyco-Electronics-datasheet-45906.pdf

© Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-2

UDC 004.3

INVESTIGATION OF A HYBRID REDUNDANCY IN THE FAULT-TOLERANT SYSTEMS

Tyurin S. F. – Dr. Sc., Professor, Professor of the Automation and Telemechanic Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; Professor of the Software Computing Systems Department, Perm State National Research University, Perm, Russia.

ABSTRACT

Context. Structural redundancy is one of the main ways to create highly reliable devices and systems for critical applications. The object of the study was hybrid redundancy in the Fault-Tolerant Systems, for example in aerospace hardware exposed to radiation.

Objective. The goal of the work is the calculation of the complexity and probability of failure-free operation of digital circuits with hybrid redundancy combining tripling, deep tripling, and quadding. The comparison shows that tripling is not always better than a circuit without redundancy over a sufficiently large time interval. Good results are obtained by tripling with three majority voters and deep tripling, but the latter significantly increases the time delay of the signal. The greatest gain in reliability provides quadding at the transistors level, but it is not always possible due to the restrictions of Mead-Conway, in addition, the delay at least is doubled. The article describes proposed method of the combined redundancy taking into account the necessary hardware costs and time delay.

Method. Determining the complexity in the units of the conditional number of transistors and maximum signal path from the input to the output in the number of transistors, as well as using the Weibull distribution to estimate the probability of failure-free operation. Simulation of proposed hybrid redundancy in the system NI Multisim by National Instruments Electronics Workbench Group. The failure-free operation probability estimation in the computer mathematics system MathCad.

Results. Expressions are obtained for the estimates of complexity, time delay and probability of failure-free operation of redundant digital circuits; curves are built in the Mathcad. Simulation confirms the performance of the proposed redundancy options.

Conclusions. The conducted studies allowed us to establish the effectiveness of hybrid redundancy to improve the reliability and the radiation resistance of the digital circuits.

KEYWORDS: Redundancy, Triple Modular Redundancy, Quadding Redundancy, Failure-Free Operation Probability.

ABBREVIATIONS

TMR is a Triple Modular Redundancy;
QR is a Quadding Redundancy;
RBD is a Reliability Block Diagram;
DT is a Deep Triple Modular Redundancy;
HR is a Hybrid Redundancy;
DNF is a Disjunctive Normal Form;
CNF is a Conjunctive Normal Form.

NOMENCLATURE

λ is a failure rate of one transistor (1 / hour);
t is an operation time in hours;
α is a Weibull distribution coefficient;
$e^{-\lambda \cdot t^{\alpha}}$ is a failure-free operation probability of the circuit without redundancy;
P_{EM} is a failure-free operation probability of the circuit with exist redundancy;
n is a common amount of the transistors in device without redundancy;
n_{EM} is a common amount of the transistors in device with exist redundancy;
n_{HR} is a common amount of the transistors in device with proposed redundancy;
τ_{EM} is a conditional time delay of the device with exist redundancy;
τ_{HR} is a conditional time delay of the device with proposed redundancy;
P_{HR} is a failure-free operation probability of the circuit with proposed redundancy;
r is a share of the transistors for QR;
e is an amount of the parryable faults;
k is an amount of the DT layers.

INTRODUCTION

Fault-Tolerance Theory is the relatively young Theory was formed from the Von Neumann works [1] to Avizenis A. [2] and further to modern researchers [3–6].

Fault-Tolerance Systems are very important in aerospace, medical, nuclear power plant, military hardware [2, 3]. Under the radiation in Integrated Circuits, two types of failures are observed [7]: some occur because of accumulation of a dose of radiation, others occur because of hitting a single particle. The first type of failure includes, for example, an increase in delays inside the Integrated Circuits or a change in logic levels. The second type of failure is called single events. Such events include, for example, the Single Event Latch. Next is Single Event Gate Rupture, Single Event Transient, Short-term state change of the logic output. Single Event Upset reversibly changes the state of the memory register, RAM, or flip-flop. Single Event Hard Error irreversibly changes the state of the memory register, RAM, or flip-flop and others.

In Radiation Hardened by Design [8–10] device are used special circuit and technological methods to increase radiation resistance for example Passive Fault-Tolerant and Active fault-tolerance technique [11]. For example,

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3

Passive Fault-Tolerant Systems uses Triple Modular Redundancy, Deep Triple Modular Redundancy, Quadding Redundancy. Similar technologies are currently being applied at the FPGA level and provides radiation protection too [12,13].

The object of study is the Passive Fault-Tolerant Systems based on RHBD Radiation Hardened by Design CMOS circuits or pass transistors circuits.

The subject of study is the Triple Modular Redundancy, Deep Triple Modular Redundancy and Quadding Redundancy methods for parrying radiation faults (single events) by Hybrid Redundancy.

The known sampling methods [4–6, 12–16] not uses hybrid types of the Triple Modular Redundancy, Deep Triple Modular Redundancy / Quadding Redundancy.

The purpose of the work is to establish Hybrid Redundancy capabilities at the CMOS transistor level.

1 PROBLEM STATEMENT

Given: $P_{EM}, n_{EM}, \tau_{EM}$ according existing methods of Fault-Tolerant Systems, Radiation Hardened by Design Systems: Triple Modular Redundancy (TMR), Deep Triple Modular Redundancy (DT), or Quadding Redundancy (QR).

In the literature [1–16], the problems of Hybrid Redundancy (HR) are not fully covered.

It is required: investigate the effectiveness of HR in the sense of complexing TMR, DT, QR and obtain P_{HR},

$$n_{HR}, \quad \tau_{HR}, \quad \delta n = n_{EM} - n_{HR}, \quad \Psi = \frac{P_{HR} - e^{-\lambda \cdot t^{\alpha}}}{\delta n}$$

according proposed HR.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The Radiation Hardened by Design methods [8–10] for parrying IC radiation faults (single events), are divided into parrying methods to reversibly changes and parrying methods to irreversibly changes.

Radiation resistance is the property of equipment, component elements and materials to perform their functions and maintain parameters within the established standards during or after ionizing radiation. To create radiation-resistant microcircuits, commercial technologies are used, for example, Silicon-on-insulator, which excludes thyristor effects. Well proven technology silicon on sapphire. The Radiation Hardened by Design methods includes parrying Single Event Upset cells of static random access memory SRAM by means of special duplication – Dual Interlocked Storage Cell [14]. For parrying faults, it is used TMR [13], NN-Transistor Structure for Defect-Tolerance at the Nanoscale [15], for example QR. TMR for the A, B, C one bit channels [3] shows Fig. 1.

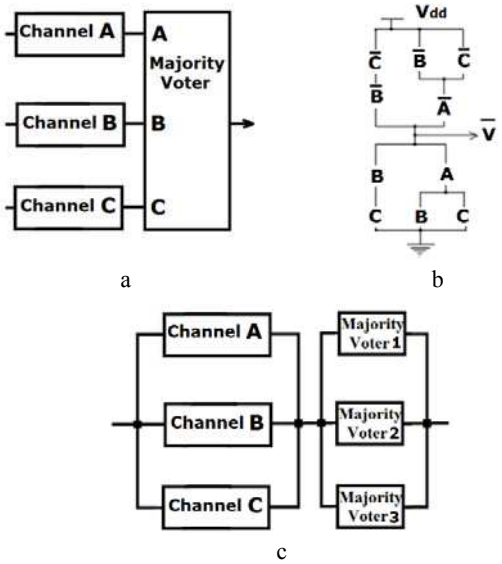


Figure 1 – TMR: a – Tripled Circuit (Channels A, B, C); b – Conditional CMOS Mirror Majority Vote Circuit (Decision Circuit); c – Conditional TMR RBD with three Majority Voter

Channels A, B, C (Fig. 1 a, c) can be single output circuits. If there are several outputs, then each requires its own Majority Vote. CMOS Mirror Majority Vote Circuit (Decision Circuit) has three A, B, C p-type transistors in the part of the circuit connected to the power supply Vdd, and three transistors of n-type in the part of the circuit connected to the Ground. Conditional TMR RBD shows logic OR of the A, B, C, bur real logic functions V (NOT V) of the Majority Vote Circuit (for the p-type transistors) are as follows:

$$\begin{gathered} V(ABC) = AB \vee AC \vee BC, \\ \overline{V}(ABC) = \overline{AB \vee AC \vee BC} = \\ (\overline{AB})(\overline{AC})(\overline{BC}) = (\overline{A} \vee \overline{B})(\overline{A} \vee \overline{C})(\overline{B} \vee \overline{C}) = \\ = \overline{A}\,\overline{B} \vee \overline{A}\,\overline{C} \vee \overline{B}\,\overline{C}. \end{gathered} \tag{1}$$

Thus, any error (radiation faults) in one of the channels A, B, C (Figure 1a, formulas 1) will not lead to an incorrect result if there is no radiation fault in the Majority Voter. In order to take into account the possibility of failure of Majority Voter, it also mast be triple (Figure 1b). In this case, the failure of one channel and one Majority Voter is allowed. This TMR is more than 300% redundancy, since Majority Voters, three more power sources and tripling of communication lines are needed. It increases reliability in a logical sense. However, it is required a quantitative assessment of reliability in the sense of probability theory

Weibull distribution [3] is most suitable for describing the reliability of circuits under conditions of radiation exposure. Let “12” is a complexity of the Majority Vote Circuit in amount of the transistors (Fig.1–b); $1 \le \alpha \le 2$. Formula (2) describes failure-free operation probability of the TMR system (Fig. 1 a).

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3

$$P_{tmr} = (3 \cdot e^{-2 \cdot (n) \cdot \lambda \cdot t^{\alpha}} - 2 \cdot e^{-3 \cdot (n) \cdot \lambda \cdot t^{\alpha}}) e^{-(12) \cdot \lambda \cdot t^{\alpha}}. \quad (2)$$

With the Majority Voters tripling (Fig. 1 c), we get formula (3)

$$P_{tmr3} = (3 \cdot e^{-2 \cdot (n) \cdot \lambda \cdot t^{\alpha}} - 2 \cdot e^{-3 \cdot (n) \cdot \lambda \cdot t^{\alpha}}) \times \times (3 \cdot e^{-2 \cdot (12) \cdot \lambda \cdot t^{\alpha}} - 2 \cdot e^{-3 \cdot (12) \cdot \lambda \cdot t^{\alpha}}). \quad (3)$$

Comparison of (3) and (2) shows great efficiency, of course at the expense of high costs. Thus, TMR can parry only one (2) or two (3) radiation failures in one channel or in one Majority Voters. TMR delay increases due to Majority Vote Circuit delay (two transistors delay of the CMOS Mirror Majority Vote Fig. 1b + additional one transistor delay of the CMOS NOT).

The analysis shows that the probability (2), (3) of increases with a larger number of parried failures and decrease failure rate of the channels A,B,C. This approach is implemented in Deep Triple Modular Redundancy (DT)

DT (k-layer tripling) shows Fig. 2 and is described by formula (4)

$$P_{dt} = [3e^{-2n\frac{\lambda}{k}t^{\alpha}} - 2e^{-3n\frac{\lambda}{k}t^{\alpha}}]^k \times \times [3e^{-2 \cdot 12\lambda\, t^{\alpha}} - 2e^{-3 \cdot 12\lambda\, t^{\alpha}}]^k, \quad (4)$$

$n\lambda$ – the failure rate of the entire channel.

With such DT (k-layer) redundancy (Fig. 2), radiation failures is parried in each k layer of the generalized channels A,B,C and in each generalized Majority Vote. This further increases costs and the time delay in the circuit due to k Majority Vote. However, the effectiveness of (4) is much higher than (2) and (3).

In common case it is parrying e radiation fault from $2e+1$, where e – number of the failures (errors), we get formula (5).

$$P(t, e, \lambda, \alpha) = \sum_{i=0}^{e} C_{2e+1}^{i} \left\{ e^{-[(2e+1)-i] \cdot \lambda \cdot t^{\alpha}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda \cdot t^{\alpha}}\right)^{i} \right\}. \quad (5)$$

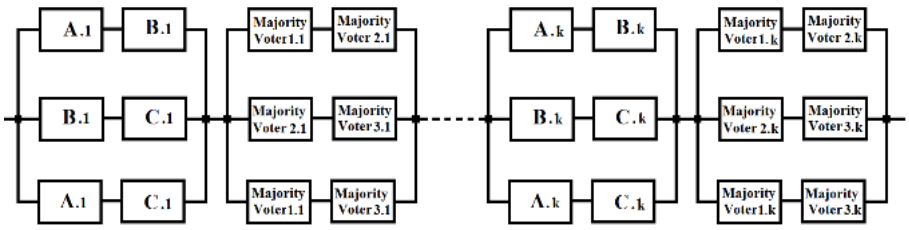
Limit of the triple redundancy depth at the present technology level – is one element (gate, flip-flop or SRAM cell), transistors cannot be tripled. However, they can be quadded [15]: A,B,C,D – four copies of one transistor for e=1 (Fig. 3).

We see (Fig. 3) that with any radiation failure (=1,= 0, NOT) of one transistor (value A=B=C=D), the logic function does not change.

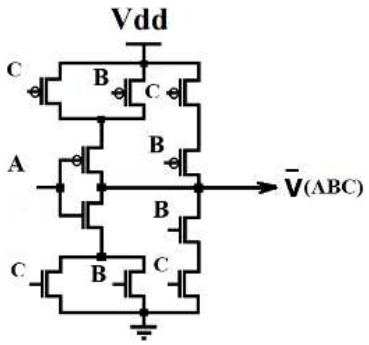
QR on transistors level does not required Majority Voters because it is implemented implicitly by connecting transistors. Therefore, we get parrying any fault of one transistors from four transistors for the each transistors in circuit unlike (2)–(5) – expression 6.

$$P(t)_{qr} = [e^{-4 \cdot \lambda \cdot t^{\alpha}} + 4 \cdot e^{-3 \cdot \lambda \cdot t^{\alpha}} (1 - e^{-\lambda \cdot t^{\alpha}})]^n. \quad (6)$$

However, redundancy increases even more – up to 400% percent with e=1.



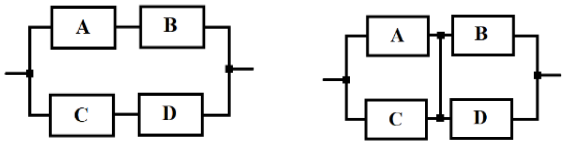
a



b

Figure 2 – DT (k-layer) a – Real RBD; b – Real CMOS Mirror Majority Vote Circuit

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3



a b

Figure 3 – QR circuits: a – DNF option; b – CNF option

In common, case parrying any faults, one of the e transistors from $(e+1)^2$ we get formula (7).

$$P_{(e)\,from\,(e+1)^2}(t)=\sum_{i=0}^{e}C^{i}_{(e+1)^2}\{e^{-[(e+1)^2-i]\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}\cdot(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})^{i}\}. \quad (7)$$

At e=2 we get 900% redundancy. At e=3 we get 1600% redundancy. Moreover, there are restrictions on the number of series-connected transistors. This is a lack of QR. Therefore, we restrict ourselves to e = 1. Besides quadding circuit time delay increases more than $\frac{(e+1)^2}{e}$ times compared to the original circuit (Fig. 3, expression 6, 7). Thus, each method has its advantages and disadvantages. It is advisable to determine the conditions for their effective combination. Based on the above, an hybridization of known methods of introducing redundancy is proposed (Hybrid Redundancy, HR).

3 MATERIALS AND METHODS

Hybrid Redundancy estimates we are obtained by possible modifying the formulas (1)–(7). First, it is necessary to determine the circuit complexity, time delay and possibly other estimates for the proposed HR. To do this, we will perform modeling of typical CMOS circuits and circuits used in the FPGA, which characterize the basic set of digital elements.

Simulation of the QR, TMR, HR is performed in the system NI Multisim by National Instruments Electronics Workbench Group.

Then it is necessary to determine failure-free operation probability of the different proposed and experimentally confirmed HR variants.

The first variant of combining redundancy P_{tmr34} is proposed: only Majority Voter (12 transistors, with additional inverter not specified in Fig. 2b) is quadded – formula (8):

$$P_{tmr34}=(3\cdot e^{-2\cdot(n)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}-2\cdot e^{-3\cdot(n)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}})\times \times[e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{12}, \quad (8)$$

In expression (8) part $(3\cdot e^{-2\cdot(n)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}-2\cdot e^{-3\cdot(n)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}})$ is tripled system including n transistors (λ is the failure rate of one transistor, 1/hour) in each A, B, C channels (Fig. 1a). Part $[e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{12}$ presents quadded Majority Voter (Fig. 2 a).

The second variant P_{tmr34g} : Quadding of the Majority Voter transistors and r-part of the n transistors; tripling of the gates with n-rn transistors is – formula (9):

$$P_{tmr34g}=(3\cdot e^{-2\cdot(n-rn)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}-2\cdot e^{-3\cdot(n-rn)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}})\times \times[e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{12+rn}. \quad (9)$$

Take into account that rn transistors are quadded so rn is added to the number of transistors in the Majority Voter (12 + rn). The same value rn is deducted from the total number n in tripled part.

This option does not take into account the requirements of the Mead-Conway [17]. It is assumed that they are respected. The third variant P_{dtqr} uses deep tripling at k(1–r) levels and nr quadding, Majority Voters are quadded:

$$P_{dtqr}=[3e^{-2n\frac{\lambda}{k}t^{\alpha}}-2e^{-3n\frac{\lambda}{k}t^{\alpha}}]^{k-kr}\cdot [3e^{-2\cdot12\lambda\,t^{\alpha}}-2e^{-3\cdot12\lambda\,t^{\alpha}}]^{k-kr}\cdot [e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{nr}. \quad (10)$$

In formula (10) subexpression $[3e^{-2n\frac{\lambda}{k}t^{\alpha}}-2e^{-3n\frac{\lambda}{k}t^{\alpha}}]^{k-kr}$ is the failure-free operation probability of the DT part of the system, $[3e^{-2\cdot12\lambda\,t^{\alpha}}-2e^{-3\cdot12\lambda\,t^{\alpha}}]^{k-kr}$ is failure-free operation probability of the k(1–r) Majority Voters according (4).

The fours variant is tripling of the quadded circuit $P_{tq(t)}$

$$P_{tq(t)}=(3\cdot e^{-2\cdot[-\frac{\ln([e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{n})]\cdot t^{\alpha}}{t^{\alpha}}}- -2\cdot e^{-3\cdot[-\frac{\ln([e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{n}]\cdot t^{\alpha}}{t^{\alpha}}})\times \times[e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{12}, \quad (11)$$

Note $-\frac{\ln([e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{n}}{t^{\alpha}}$ is the failure rate of the quadded part. Therefore, the expression (11) is not simplified. Second element of the (11) is equal the second element of the (8).

The next variant $P_{tmr34gt}$ – part of the gates with n transistors is quadding (gates with rn transistors); tripling of the gates with n-rn transistors + Majority Voter is quadding – formula 12.

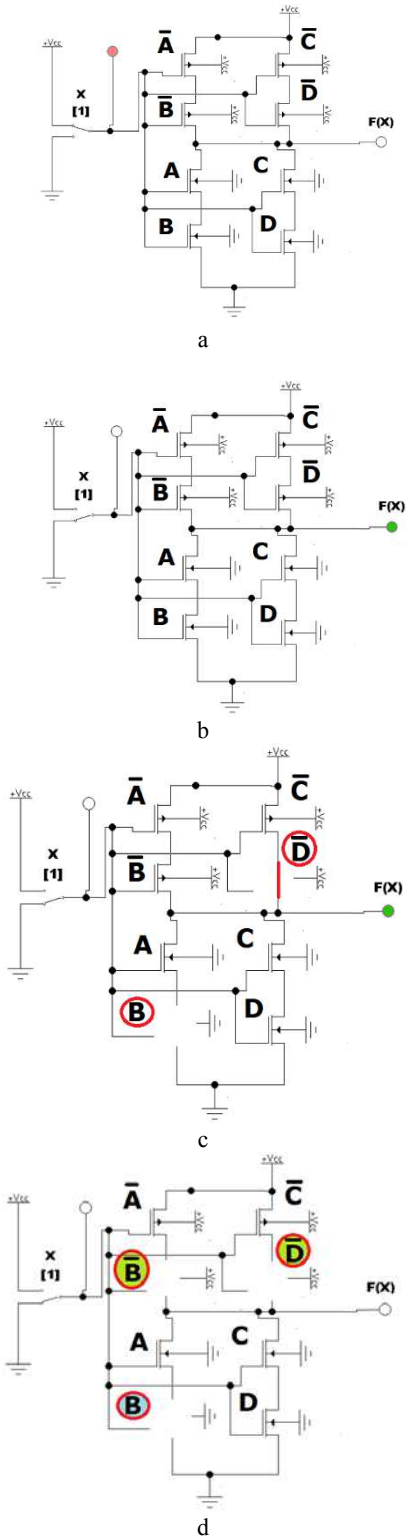
$$P_{tmr34gt}=(3\cdot e^{-2\cdot[(n-rn)\cdot\lambda-\frac{\ln([e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{rn})]\cdot t^{\alpha}}{t}}- -2\cdot e^{-3\cdot[(n-rn)\cdot\lambda-\frac{\ln([e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{rn}]\cdot t^{\alpha}}{t}})\times \times[e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}+4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{12}, \quad (12)$$

So formula (12) is combined expression (9) and (11). Failure-free operation probability according existing and proposed expressions is estimated in the computer mathematics system MathCad. Hardware conditional costs in number of the transistors, conditional time delay are corrected taking into account experimental resalts.

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3

4 EXPERIMENTS

Let us perform simulation of the base CMOS logic gates with QR. For example simplest CMOS NOT QR (CNF option) gate static simulation shows Fig. 4.



a

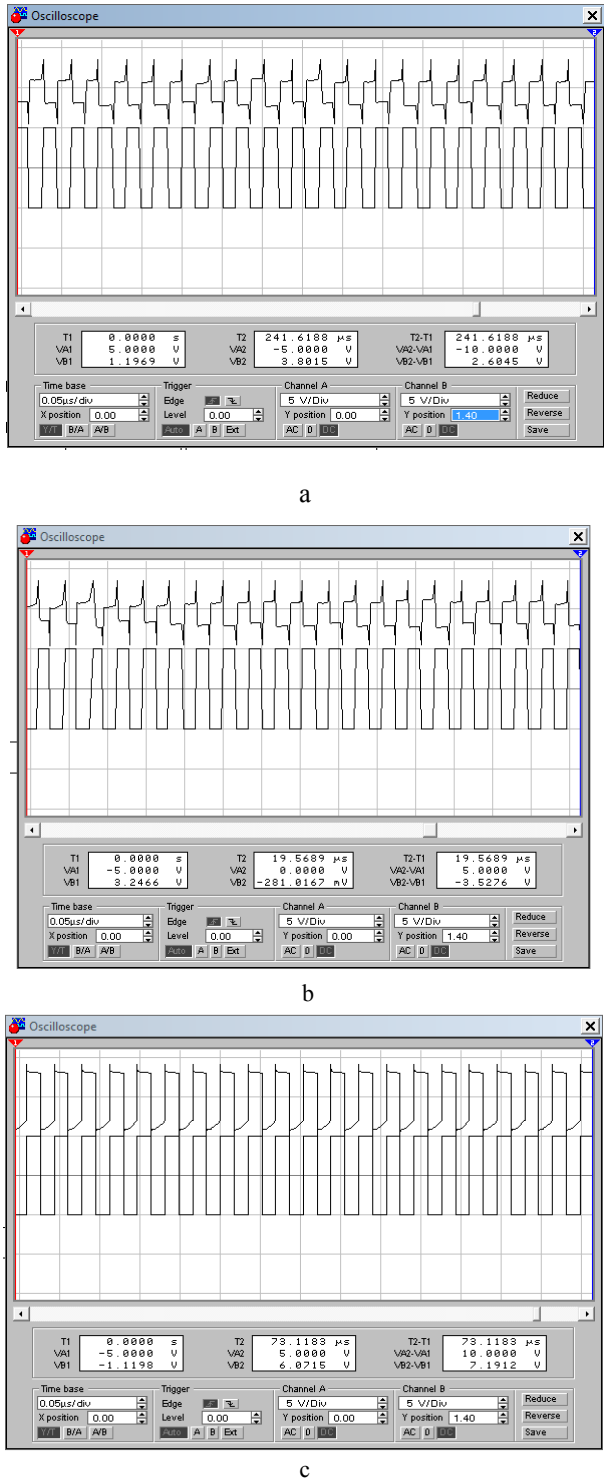
b

c

d

Figure 4 – QR of the CMOS NOT Gate static simulation: a – x=1; $F(x)$=0; b – x=0; $F(x)$=1; c – defaults B, $\overline{D}$; d – default CMOS NOT at defaults B, $\overline{B}$, $\overline{D}$.

Fig. 4 corresponds to QR DNF option (Fig. 3 a). QR parry any single radiation defect in A,B,C,D or/and $\overline{A},\overline{B},\overline{C},\overline{D}$ (Fig. 4 c). The number of transistors quadruples from two to eight and the delay in the number of transistors in the path from Power supply twice.



a

b

c

Figure 5 – QR CMOS NOT Gate dynamic simulation: a – Quad NOT normal waveform; b – Single Fault – Quad NOT correct waveform; c – Two Faults – Quad NOT defect waveform

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3

Since the NOT Gate have a single transistor in each of the two parts of the circuit, the QR leads to a twofold increase of the time delay so the Mead-Conway constraints [15] are performed.

It is easy to see that the QR in the logical gate 2NAND (2NOR) will lead to a path of a maximum of four transistors. These restrictions allow for a series of no more than four transistors. As a rule, we are talking even about three transistors. For example, in FPGA, after every three transistors, a signal-level restorer is installed. Four transistors in a row are present, for example, in 4NAND (4NOR). It is clear that the direct QR of 3NAND (3NOR) is unacceptable, the decomposition by 2NAND (2NOR) is required. Fig. 5 shows dynamic simulation results of the QR NOT gate without faults – a; with single fault, (e=1) – b; with two faults, (e=2) – c.

Fig. 5 b, c confirms that with one fault (for example – default B, $\overline{D}$ Fig.4 c) the circuit functions correctly, the circuit is not operational if two transistors fail in one part of the circuit (for example – default A,B Fig.4).

At the same time, the Majority Voter (Fig. 2 b) performs NOT function of the three channels with the same time delay, but the cost is ten transistor.

LUT FPGA – is the universal logical module or functional generator or multiplexer $2^n \rightarrow 1$, for example at n=1: SRAM0 is the F(0), SRAM1is the F(1).

A comparison QR with TMR shows the preference QR for energy consumption, for example as shown Fig. 6 for the TMR and QR LUT FPGA (n=1).

Fig. 6 a, b does not take into account additional inverters for the output and inputs, which are taken into account in the Fig. 6 c.

Simulation of the LUT-2 and the measuring of the power consumption of the LUTs shows Fig. 7.

Similarly, was performed the simulation and investigation of the redundancy SRAM cell, D-flip-flop, 3-state buffer.

Then let us build Failure-free operation probability curves in the computer mathematics system MathCad based on the results of circuits simulation.

5 RESULTS

The simulation results of the TMR and/or QR FPGA's basic elements confirmed the possibility of the proposed combined redundancy. As it turned out, the QR gives a gain in power consumption (Fig. 7 b).

Comparative curves of the original CMOS NOT circuit failure-free operation probability and TMR, TMR3, QR shows Fig. 8 – a, b. Fig. 8 – c, n=20, – d, n=100 graphically illustrates the QR advantage with increasing number of transistors n.

Increasing of the failure-free operation probability by using hybrid redundancy demonstrates Fig. 8 – e, n=50; r=0.5; k=10; – f, n=100; r=0.4; k=7. The unit specific probability (Formula 13) is obtained taking into account the costs in number of the transistors (Table 1).

$$\Psi_{P_\xi} = \frac{P_\xi - e^{-n\lambda \cdot t^\alpha}}{\delta n}. \quad (13)$$

Charts are shown on Fig. 8 – g, t=50; r=0.7; k=10; – h, t=10; r=0.5; k=7.

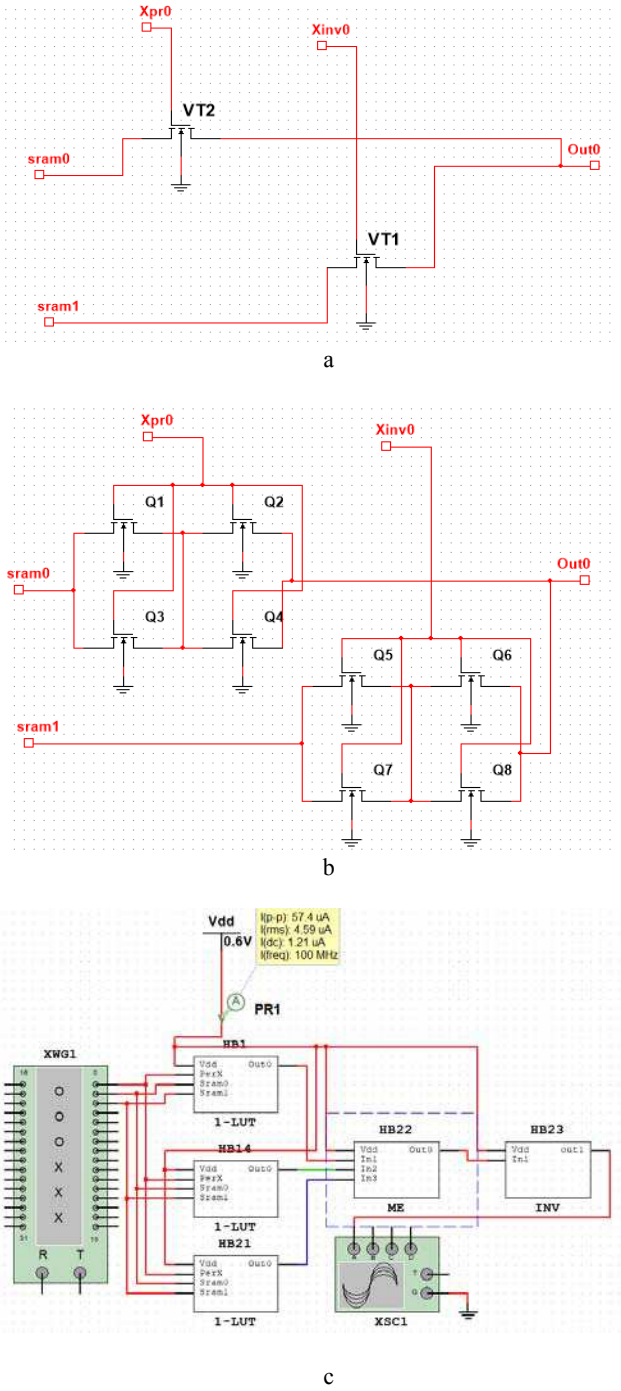
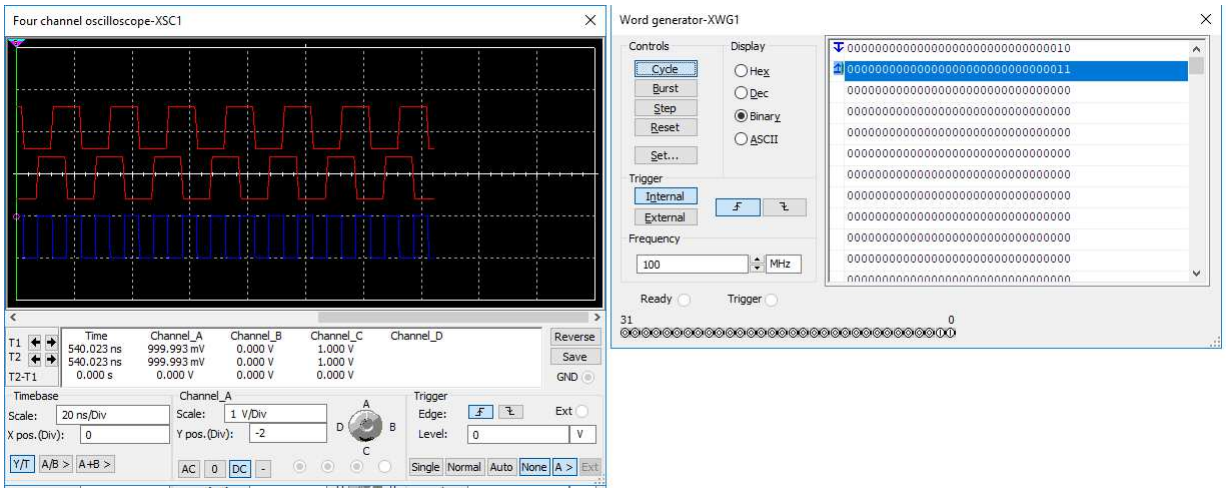
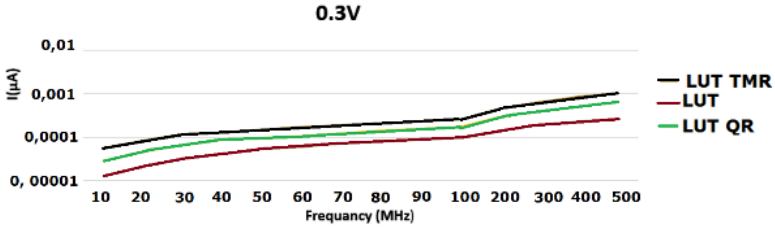


Figure 6 – Experiment with LUT FPGA (n=1): a – LUT-1; b – QR LUT-1 and c – LUT-1 TMR

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3



a



b

Figure 7 – LUT-2 simulation: a – XOR waveform; b – a comparison power consumption of the LUTs at 0,3 V Power Supply

Table 1 – The hardware and time costs of the QR/TMR and HR

№	Failure-free operation probability symbol	Hardware conditional costs in number of the transistors	Conditional time delay	Note
1	P_{tmr}	$3n+12$	τ_n+2	TMR, Excluding additional power supplies; τ_n – time delay of the circuit with n transistors; 2– time delay of the Majority Voter
2	P_{tmr3}	$3n+36$	τ_n+2	TMR3, Majority Voters tripling
3	P_{dt}	$3n+36k$	τ_n+2k	DT, Majority Voters tripling
4	P_{qr}	$4n$	$2\tau_n$	QR, Without taking into account the decomposition
5	P_{tmr34}	$3n+48$	τ_n+4	HR (TMR+QR) Majority Voter
6	P_{tmr34g}	$3n(1-r)+4nr+48$	$\tau_{n(1-r)}+2\tau_{nr}+4$	HR (TMR+QR) Majority Voter
7	P_{dtqr}	$3n(1-r)+4nr+48k$	$\tau_{n(1-r)}+2\tau_{nr}+4k$	HR (DT+QR)
8	$P_{tq(t)}$	$12n+48$	$2\tau_n+2$	HR (TMR+QR)
9	$P_{tmr34gt}$	$12n(1-r)+4nr+48$	$2\tau_{n(1-r)}+2\tau_{nr}+4$	HR (TMR+QR)

6 DISCUSSION

As it evident from the Fig. 8 – a,b with a small "n", the TMR P_{tmr} is worse than the non-redundant circuit. TMR P_{tmr3} wins only to probability 0.99 (n=2, t=60), and then it becomes lower than the non-redundant circuit. At the same time, QR P_{qr} is better any TMR. However, and G falls below after a probability of about 0.6 (t about 800). With an increase in n (20, 100) QR wins over the entire time interval (Fig. 8 – c, d).

The direct introduction of QR into logical elements with e = 1 is possible only for two-seat operations, and for the implementation of the others logic gates decomposition is necessary, which increases the complexity and delay.

$P_{tq(t)}$ allows to achieve maximum reliability (Fig. 8 – e, f), but this requires a very large redundancy (Table 1).

Quadding "not more expensive" than CMOS tripling (Table 1) in case a large number of outputs m, since each

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3

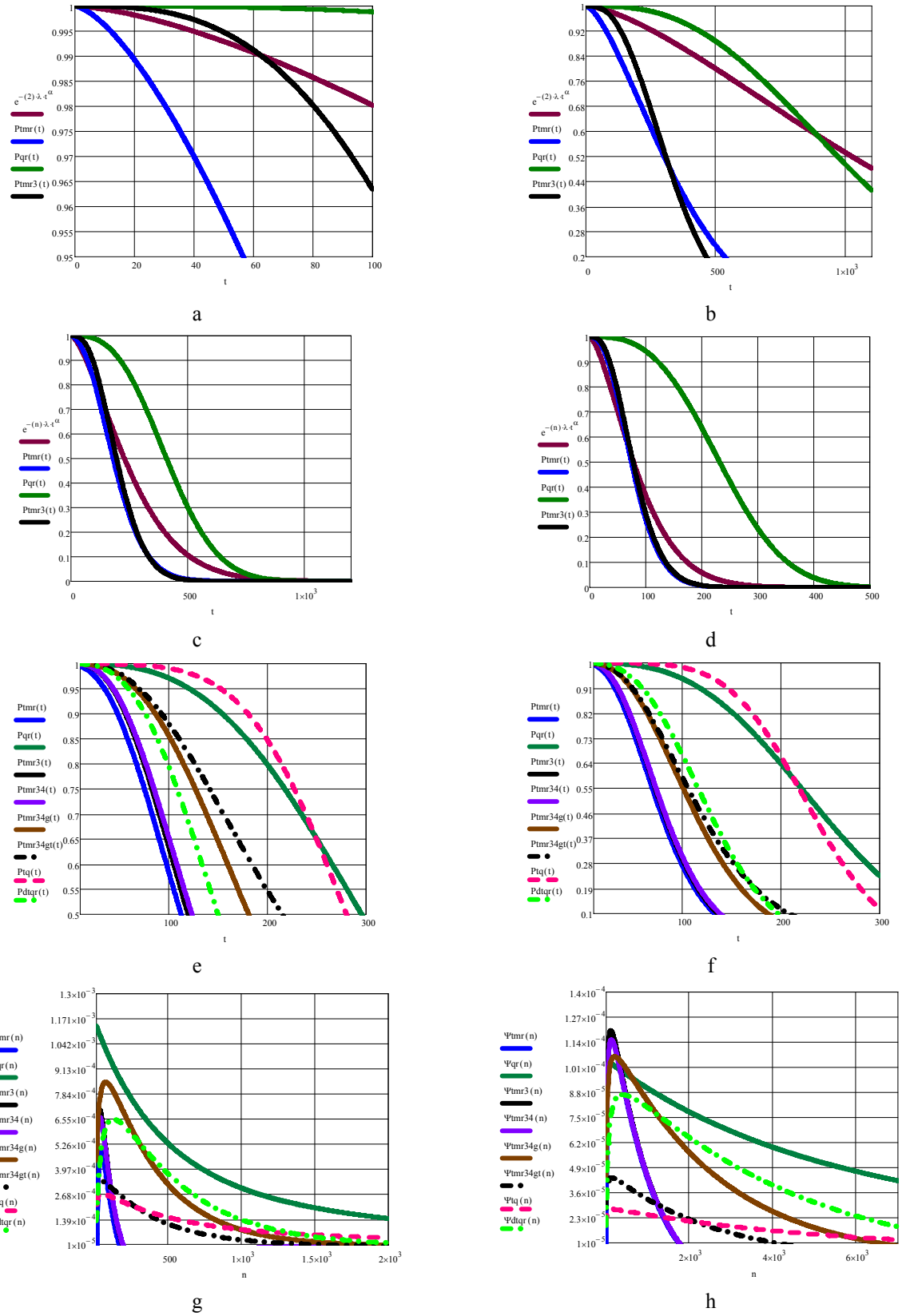


Figure 8 – Failure-free operation probability of the TMR, QR, HR:
a – n=2, t=0…100; b – n=2; t=0…1000; c – n=20; d – n=100; e – n=50 r=0,5; k=10 ; f – n=100; r=0,4; k=7; g – t=50; r=0,7; k=10;
h – t=10; r=0.5; k=7; $\lambda = 10^{-5}, \alpha = 1.5$

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3

of them must has TMR Voter (12 transistors), that determined by the formula (8):

$$4n \le 3n + 12m \Rightarrow 1 \le 12\frac{m}{n}. \quad (14)$$

For example 2NOR (2NAND) gate has n=four, so we get 16 transistors (QR) against 24 (TMR). In addition, time delay TMR 2NOR (2NAND) in amount of the transistors is five, time delay QR 2NOR (2NAND) is equal four. That is, with a small n there is an advantage in terms of complexity and delay even at *m*=1! However, TMR, unlike QR, takes into account the failure of one of the three power sources. However, it can be shown that K has the ability to connect a backup power source.

It is easy to see that redundancy at the circuit level and even more so at the channel level is worse than redundancy at the level of individual transistors.

Failure-free operation probability of quadding channel requires specific CMOS voter circuit (for example Fig. 4). Quadding transistors (6) better than quadding circuits (15) and channels (16):

$$P(t)_{4-circuit} = [e^{-4\cdot n\lambda\cdot t^{\alpha}} + 4\cdot e^{-3\cdot n\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-n\lambda\cdot t^{\alpha}})]. \quad (15)$$

$$P(t)_{4-channel} = [e^{-4\cdot n\lambda\cdot t^{\alpha}} + 4\cdot e^{-3\cdot n\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-n\lambda\cdot t^{\alpha}})]\times \times[e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}} + 4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]. \quad (16)$$

Option (15) for time delay is equivalent to (6), although it is possible that this option (15) is preferable technologically, this requires further study of the corresponding sizes of the crystals areas. At the same time, (15) requires compliance with the Mead-Conway restrictions, and (16) does not.

However, channel quadded-structure (16) much worse than quadded-transistor (6) and tripling (2), (3), (4).

Taking into account the restrictions of Mead-Conway, DT with partial QR P_{dtqr} (Fig. 8 – e, f) is most preferable compared to clean redundancy (Fig. 8 – c, d). The specific unit probability of the P_{dtqr} is most preferable too (Fig. 8 – g, h).

However, P_{dtqr} requires a significant increase of the latency "input-output" which may be unacceptable in some cases.

Therefore useful TMR-QR P_{tmr34g} (Fig. 8 – g, h) in the case of strict limitations in the time delay.

CONCLUSIONS

The problem of creating Passive Fault-Tolerant Systems with Hybrid Redundancy is urgent, as known types of redundancy in some cases do not allow achieving the required reliability in radiation conditions.

The scientific novelty of obtained results is that the proposed method uses a combination of Triple Modular Redundancy, Deep Triple Modular Redundancy, Quadding Redundancy, taking into account the necessary hardware costs and time delay. The resulting estimates and expressions allow finding the desired and optimal option in specific conditions.

The practical significance of obtained results lies in the fact that the simulation of the proposed options for redundancy confirmed their effectiveness, which allows you to create systems with a new level of reliability and radiation resistance

Prospects for further research are to study the problem of optimal Quadding Redundancy decomposition for the satisfaction of the Mid-Conway restrictions in the modern FPGA's LUTs [18].

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was carried out with the support of the Department of Automation and Remote Control of the Perm National Research Polytechnic University (Head of the department Prof. Yuzhakov Alexander Anatolievich) and of the Department of Software Computing Systems of the Perm State National Research University (Head of the department PhD Chuprina Svetlana Igorevna).

Grate thanks to the PhD students Vikhorev R. V., Prohorov A. S.

Special thanks to the honored inventor of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor Kharchenko Vyacheslav Sergeyevich (National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"), and to the Doctor of Technical Sciences, Professor Drozd Alexander Valentinovich (Odessa National Polytechnic University).

REFERENCES

1. Shannon Claude E. Von Neumann's contributions to automata theory [Electronic resource]. – Access mode: https://pdfs.semanticscholar.org/3903/d10dfccfe2c3e5bee9603644c9ef2a45b9e7.pdf
2. Avizienis A. Fault-Tolerance Systems, IEEE Transactions on computers, 1976, Vol. 25, No. 12, pp. 1304 –1312. ISSN: 0018-9340
3. Daniel P. Siewiorek, Robert S. Swarz. Reliable computer systems: design and evaluation. Amsterdam, Published by Digital Press, 1992, P. 908. eBook ISBN: 9781483297439
4. Wali I., Virazel A., Bosio A. et al. A Hybrid Fault-Tolerant Architecture for Highly Reliable Processing Cores, *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2016, No. 32, pp. 147–161. DOI: 10.1007/s10836-016-5578-0
5. Lu Y., Dong Y., Wei X., et al. A Hybrid Method of Redundancy System Reliability Analysis Based on AADL Models, *IEEE 18th International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion, QRS-C 2018, 16–20 July 2018: proceedings*. Lisbon, IEEE, 2018, pp. 294–300. DOI: 10.1109/QRS-C.2018.00060
6. Wali I., Virazel A., Bosio A. et al. Design space exploration and optimization of a Hybrid Fault-Tolerant Architecture, *21st IEEE International On-Line Testing Symposium, July 6–8, 2015: proceedings*. Halkidiki, Greece, IEEE, 2015, pp. 89–94. DOI:10.1109/IOLTS.2015.7229838
7. Howard J. W., Jr., Hardage D. M. Spacecraft Environments Interactions: Space Radiation and Its Effects on Electronic Systems [Electronic resource]. Access mode: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19990116210.pdf

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3

8. Fa-Xin Yu, Jia-Rui Liu, Zheng-Liang Huang, Hao Luo and Zhe-Ming Lu. Overview of Radiation Hardening Techniques for IC Design [Electronic resource]. Access mode: https://scialert.net/fulltext/?doi=itj.2010.1068.1080
9. Steven Redant, Emmanuel Liégeon. Radiation Hardening by Design. Low Power, Radiation Tolerant Microelectronics Design Techniques [Electronic resource]. Access mode: http://microelectronics.esa.int/mpd2004/DARE-ESA-MPD2004.pdf
10. Radiation-hardened space electronics enter the multi-core era. Military & Aerospace Electronics [Electronic resource]. – Access mode: https://www.militaryaerospace.com/articles/print/volume-28/issue-6/technology-focus/radiation-hardened-space-electronics-enter-the-multi-core-era.html
11. Error Detection or Correction of the Data by Redundancy in Hardware (epo) Patents (Class 714/E11.054) [Electronic resource]. Access mode: https://patents.justia.com/patents-by-us-classification/714/E11.054
12. Shankarnarayanan Ramaswamy, Leonard Rockett, Dinu Patel and others A Radiation Hardened Reconfigurable FPGA [Electronic resource]. Access mode: https://pdfs.semanticscholar.org/57f8/ff540360eadceafc062797b7a01065f6f9cc.pdf
13. Carl Carmichael. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs [Electronic resource]. Access mode: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf
14. Danilov I. A., Gorbunov M. S., Shnaider A. I., Balbekov A. O., Rogatkin Y. B., Bobkov S. G. On board electronic devices safety provided by DICE-based Muller C-element. Acta Astronautica [Electronic resource]. Access mode: http://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/141698.pdf
15. Aiman H. El-Maleh, Ahmad Al-Yamani and Bashir M. Al-Hashimi. Transistor-Level Defect Tolerant Digital System Design at the Nanoscale. Research Proposal Submitted to Internal Track Research Grant Programs [Electronic resource]. Access mode: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.474.3844&rep=rep1&type=pdf
16. Huang R.H.-M., Hsu D.K.-H. et al. A Determinate Radiation Hardened Technique for Safety-Critical CMOS Designs, *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications (JETTA)*, 2015, No. 31, pp. 181–192. DOI: 10.1007/s10836-015-5517-5
17. Carver A. Mead, Lynn Conway Introduction to VLSI Systems. [Electronic resource]. Access mode: https://www.researchgate.net/publication/234388249_Introduction_to_VLSI_systems
18. Tyurin S. F., Grekov A. V. Study of the multy input LUT complexity, *Radio Electronics, Computer Science, Control,* 2018, No. 1, pp. 14–21. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-2

Received 29.10.2018.
Accepted 28.03.2019.

УДК 004.93

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІБРИДНІ НАДЛИШКОВОСТІ В ВИДМОВОСТОЙКИХ СИСТЕМАХ

Тюрін С. Ф. – Заслужений винахідник Російської Федерації, д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматики і телемеханіки Пермського національного дослідницького політехнічного університету, Пермь, Росія; професор кафедри математичного забезпечення обчислювальних систем Пермського державного національного дослідницького університету, Пермь, Росія.

АННОТАЦІЯ

Актуальність. Структурне резервування є одним з основних способів створення високонадійних пристроїв та систем для критично важливих додатків. Об’єктом дослідження була гібридна надмірність в відмовостійких системах, наприклад, в аерокосмічному обладнанні, яке знаходиться під впливом радіації.

Завдання. Метою даної роботи є розрахунок складності і ймовірності безвідмовної роботи цифрових схем з гібридним резервуванням, що поєднують троїрування (мажоритування), глибоке мажоритування і розчетверування. Порівняння показує, що троїрування не завжди краще, ніж схема без надмірності в кінці чималого інтервалу часу. Хороші результати досягаються шляхом троїрування з трьома мажоритуваннями і глибоке мажоритування, але останнє значно збільшує часову затримку сигналу. Найбільший виграш в надійності досягається за рахунок розчетверування на рівні транзисторів, але це не завжди можливо через обмеження Міда-Конвей, крім того, затримка як мінімум подвоюється. У статті описаний запропонований метод комбінованого резервування з урахуванням необхідних апаратних витрат і часу затримки.

Метод. Визначення складності в одиницях умовного числа транзисторів і максимального шляху проходження сигналу від входу до виходу за кількістю транзисторів, а також використання розподілу Вейбулла для оцінки ймовірності безвідмовної роботи. Моделювання передбачуваної гібридної надмірності в системі NI Multisim від National Instruments Electronics Workbench Group. Оцінка ймовірності безвідмовної роботи в системі комп’ютерної математики MathCad.

Результати. Отримані вирази для оцінки складності, з невеликою затримкою і ймовірністю безвідмовної роботи резервованих цифрових схем; графіки будуються в Mathcad. Моделювання підтверджує ефективність запропонованих варіантів резервування.

Висновки. Проведені дослідження дозволили встановити ефективність гібридного резервування для підвищення надійності і радіаційної стійкості цифрових схем.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: надлишковість, троїрування, розчетверування, ймовірність безвідмовної роботи.

УДК 004.93

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ В ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМАХ

Тюрин С. Ф. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматики и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия; профессор кафедры математического обеспечения вычислительных систем Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия.

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Структурное резервирование является одним из основных способов создания высоконадежных устройств и систем для критически важных приложений. Объектом исследования была гибридная избыточность в отказоустойчивых системах, например, в аэрокосмическом оборудовании, подверженном воздействию радиации.

Задача. Целью данной работы является расчет сложности и вероятности безотказной работы цифровых схем с гибридным резервированием, сочетающих троирование (мажоритирование), глубокое мажоритирование и расчетверение. Сравнение показывает, что троирование не всегда лучше, чем схема без избыточности в конце достаточно большого интервала времени. Хорошие результаты достигаются путем троирования с тремя мажоритарами и глубокое мажоритирование, но последнее значительно увеличивает временную задержку сигнала. Наибольший выигрыш в надежности достигается за счет расчетверения на уровне транзисторов, но это не всегда возможно из-за ограничений Мида-Конвей, кроме того, задержка, как минимум, удваивается. В статье описан предложенный метод комбинированного резервирования с учетом необходимых аппаратных затрат и времени задержки.

Метод. Определение сложности в единицах условного числа транзисторов и максимального пути прохождения сигнала от входа к выходу по количеству транзисторов, а также использование распределения Вейбулла для оценки вероятности безотказной работы. Моделирование предполагаемой гибридной избыточности в системе NI Multisim от National Instruments Electronics Workbench Group. Оценка вероятности безотказной работы в системе компьютерной математики MathCad.

Результаты. Получены выражения для оценки сложности, временной задержки и вероятности безотказной работы резервированных цифровых схем; графики строятся в Mathcad. Моделирование подтверждает эффективность предложенных вариантов резервирования.

Выводы. Проведенные исследования позволили установить эффективность гибридного резервирования для повышения надежности и радиационной стойкости цифровых схем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: избыточность, троирование, расчетверение, вероятность безотказной работы.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Shannon, Claude E. Von Neumann's contributions to automata theory. [Electronic resource]. – Access mode: https://pdfs.semanticscholar.org/3903/d10dfccfe2c3e5bee9603644c9ef2a45b9e7.pdf
2. Avizienis A. Fault-Tolerance Systems / A. Avizienis // IEEE Transactions on computers. – 1976. –Vol. 25, № 12. – P. 1304 – 1312. ISSN: 0018-9340
3. Daniel P. Siewiorek. Reliable computer systems: design and evaluation / Daniel P. Siewiorek, Robert S. Swarz. –Published by Digital Press, 1992. – P. 908. eBook ISBN: 9781483297439
4. A Hybrid Fault-Tolerant Architecture for Highly Reliable Processing Cores / [I. Wali, A. Virazel, A. Bosio et al.] // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications (JETTA). – 2016. – № 32. – P. 147–161. DOI: 10.1007/s10836-016-5578-0
5. A Hybrid Method of Redundancy System Reliability Analysis Based on AADL Models / [Y. Lu, Y. Dong, X. Wei et al.] // IEEE 18th International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion, QRS-C 2018, 16–20 July 2018: proceedings. – Lisbon : IEEE, 2018. – P. 294–300. DOI: 10.1109/QRS-C.2018.00060
6. Wali I. Design space exploration and optimization of a Hybrid Fault-Tolerant Architecture / [I. Wali, A. Virazel, A. Bosio et al.] // 21st IEEE International On-Line Testing Symposium, July 6–8, 2015: proceedings. – Halkidiki, Greece : IEEE, 2015. – P. 89–94. DOI:10.1109/IOLTS.2015.7229838
7. Howard J. W. Spacecraft Environments Interactions / J. W. Howard, Jr., D. M. Hardage // Space Radiation and Its Effects on Electronic Systems [Electronic resource]. – Access mode: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19990116210.pdf
8. Fa-Xin Yu Overview of Radiation Hardening Techniques for IC Design / [Fa-Xin Yu, Jia-Rui Liu, Zheng-Liang Huang et al.]. – [Electronic resource]. – Access mode: https://scialert.net/fulltext/?doi=itj.2010.1068.1080
9. Steven Redant, Emmanuel Liégeon. Radiation Hardening by Design. Low Power, Radiation Tolerant Microelectronics Design Techniques / Steven Redant, Emmanuel Liégeon. – [Electronic resource]. – Access mode: http://microelectronics.esa.int/mpd2004/DARE-ESA-MPD2004.pdf
10. Radiation-hardened space electronics enter the multi-core era. Military & Aerospace Electronics [Electronic resource]. – Access mode: https://www.militaryaerospace.com/articles/print/volume-28/issue-6/technology-focus/radiation-hardened-space-electronics-enter-the-multi-core-era.html
11. Error Detection or Correction of the Data by Redundancy in Hardware (epo) Patents (Class 714/E11.054) [Electronic resource]. – Access mode: https://patents.justia.com/patents-by-us-classification/714/E11.054
12. A Radiation Hardened Reconfigurable FPGA / [Shankarnarayanan Ramaswamy, Leonard Rockett, Dinu Patel et al.]. – [Electronic resource]. – Access mode: https://pdfs.semanticscholar.org/57f8/ff540360eadceafc062797b7a01065f6f9cc.pdf
13. Carl Carmichael. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs [Electronic resource]. – Access mode: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf
14. On board electronic devices safety provided by DICE-based Muller C-element. Acta Astronautica [Electronic resource] / [I. A. Danilov, M. S. Gorbunov, A. I. Shnaider et al.] – Access mode: http://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/141698.pdf
15. Aiman H. El-Maleh Transistor-Level Defect Tolerant Digital System Design at the Nanoscale. Research Proposal Submitted to Internal Track Research Grant Programs / Aiman H. El-Maleh, Ahmad Al-Yamani and Bashir M. Al-Hashimi. – [Electronic resource] – Access mode: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.474.3844&rep=rep1&type=pdf
16. A Determinate Radiation Hardened Technique for Safety-Critical CMOS Designs / [Huang R.H.-M., Hsu D.K.-H. et al.] // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications (JETTA). – 2015. – № 31. – P. 181–192. DOI: 10.1007/s10836-015-5517-5
17. Carver A. Mead. Introduction to VLSI Systems / Carver A. Mead, Lynn Conway. – [Electronic resource]. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/234388249_Introduction_to_VLSI_systems
18. Tyurin S. F. Study of the multy input LUT complexity / S. F. Tyurin, A. V. Grekov // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – № 1. – P. 14–21. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-2

© Tyurin S. F., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-3

УДК 621.396.6, 621.8.019.8

METHOD FOR PREDICTING THE DURABILITY OF ELECTRONIC EQUIPMENT

Zhadnov V. V. – PhD, Associate Professor, Professor of Department of Electronic Engineering, National Research university "Higher ichool of economics", Moscow, Russia.

Kulygin V. N. – Master of Engineering and Technology, Post-graduate Student of the Moscow Institute of Electronics and Mathematics A. N. Tikhonov National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia.

Zotov A. N. – Master of Engineering and Technology, post-graduate student of the Moscow institute of electronics and mathematics A. N. Tikhonov National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia.

ABSTRACT

Context. Constant growth of spacecraft operating life requirements leads to creating equipment which fits these requirements. From this point of view, specifically durability prediction allows to evaluate the potential of creating equipment with a long operating life. On early stages of equipment's development analytical methods of durability prediction are used. Obviously, the more precise the estimation is, the more likely that the practical test will confirm the durability predictions. Therefore, improving the engineering techniques of the durability prediction is a relevant problem.

Objective. The objective of this research is to improve the quality of design work by enhancing the engineering techniques of the durability prediction, which raise the authenticity of the evaluations.

Method. Life of the equipment are calculated using the statistical modelling method (Monte-Carlo method). This method takes into consideration probabilistic characteristics of constituent elements' life.

Results. As a result, the problem of predicting operating life of electronic equipment using the reference data on early stages of development is solved. An analysis of standardized method of durability prediction was performed which revealed existing limitations for using this method when predicting operating life of electronic equipment. An alternate, statistical method of predicting operating life of electronic equipment was suggested and a software implementation was created. Developed software was tested and verified. Analytical experiments were performed to show the authenticity of the suggested method and to compare it to the standardized one.

Conclusions. Thus, results of the performed research show that the standardized method is applicable only for calculating the minimum operating time. Also, it was concluded that the truncation parameter of element's life distribution, variation coefficient of life and some specific qualities of dependability prediction scheme have to be taken into consideration when predicting durability of electronic equipment.

KEYWORDS: electronic equipment, dependability, durability, life, design automation, simulation.

NOMENCLATURE

EE – electronic equipment;

TT – technical task;

DM – durability measure;

EC – electronic component;

DS – data sheet;

LS – limiting state;

m – mean;

g – group;

ASONIKA-K-D – software for calculating durability indicators of electronic equipment;

PK ASONIKA-K – software complex for calculating dependability indicators of electronic equipment;

$T_{p.\gamma}$ – gamma-percentile life;

$T_{н.м}$ – minimum operating time;

P – probability;

$\overline{T_{p_1}}$ – life vector of electronic components;

$\overline{T_{p_2}}$ – life vector of the electronic components that reached the limit state;

χ_γ – quantile of the normal distribution;

γ – probability for which the life is calculated, expressed as a percentage;

t_p – life;

$m(t_p)$ – mathematical expectation of life;

$\sigma(t_p)$ – standard deviation of life;

v – variation coefficient of life;

$T_{p.m}$ – mean life;

v_m – mean variation coefficient of life;

v_n – variation coefficient of life of the n-th electronic component;

N – number of electronic components in electronic equipment;

$m(t_p)_n$ – mathematical expectation of life of the n-th electronic component;

$\sigma(t_p)_n$ – standard deviation of life of the n-th electronic component;

$T_{p.\gamma n}$ – gamma-percentile life of the n-th electronic component;

γ_n – probability for which the life of the n-th electronic component is calculated, expressed as a percentage;

$T_{H.M_n}$ – minimum operating time of the n-th electronic component;

K_{LS} – limiting state criterion of electronic equipment;

k – number;

$\hat{t}_{p_k}$ – k-th life realization;

$\hat{t}_{p_{EE}}$ – life realization of electronic equipment;

© Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-4

$\hat{t}_{p_n}$ – life realization of the *n*-th electronic component;

l – number;

$\hat{t}_{p_l}$ – *l*-th life realization;

$\gamma_{ЭМ}$ – probability for which the life of electronic equipment is calculated, expressed as a percentage;

M – number of simulation experiments;

$T_{p.\gamma_{EE}}$ – gamma-percentile life of electronic equipment;

x_n – *n*-th realization of random variable;

K_{LS_g} – limiting state criterion of reserved group;

$\hat{t}_{p_g}$ – life realization of reserved group;

N_g – number of electronic components in reserved group.

INTRODUCTION

Level of quality of renewable and modifiable electronic equipment largely depends on quality and effectiveness of engineering such equipment. This is a big factor in competitiveness on global and local markets. Moreover, this applies to modern on-board equipment of spacecraft which has complex operating algorithms, heightened dependability, noise immunity and persistence against external influences.

Besides, in addition to growing complexity of equipment and more strict requirements, time allotted for designing machinery is shortened. First stages of engineering are usually hindered by countless revisions and modification targeted not to raise the quality of equipment, but to eliminate flaws, defects and failures. This happens due to a number of shortcomings of traditional engineering process, mostly from insufficient integration of math modeling into modern information technology.

Main difficulties of using math modeling methods in engineering process come from two reasons. Firstly, methods of selecting and analyzing engineering decisions are not developed enough. In addition, malfunctions modeling and dependability-oriented engineering are often neglected. Secondly, there aren't many software packages to choose from, and their capabilities are limited.

Modern reliability calculation software packages (ASRN, "ARBITR", "Nadejnost" module of KOK complex, "Reliabilty" modules of CAD-systems, RAM Commander, WQS, BlockSim and others) focus mostly on reliability prediction, leaving durability out. However, these factors do matter a lot for spacecraft with its long lifespan, and for competitiveness on the market too.

It is known that durability is established with design, implemented with manufacturing and kept with maintenance. Better accuracy of durability characteristics evaluation on early stages of designing means more chances to construct durable equipment. This makes improving methods of durability characteristics calculation for equipment with heightened operating life a relevant problem.

This research examines standard procedure of equipment's life prediction and also methods, models and algorithms used for equipment durability analysis.

The objective of this research is to heighten equipment engineering quality by improving durability calculation method with durability probability characteristics of equipment's composite elements usage.

1 PROBLEM STATEMENT

Durability characteristics of equipment's components is the initial data for equipment operating life prediction. These characteristics are «minimum operating time» and «gamma-percentile life». Result of the calculations is the gamma-percentile life of electronic equipment which indicates the time during which equipment won't reach it's limiting state with gamma-probability. Limiting state criterion of electronic equipment is decided by a predetermined percentage of equipment's components reaching their life expectancy (in the worst-case scenario – of any component). Based on this, mathematical problem of equipment's operating life prediction comes to calculating equation (1) for $T_{p.\gamma_{EE}}$:

$$\frac{\gamma}{100} = P\left(\overline{T_{p_1}} \geq T_{p.\gamma_{EE}} \middle| \overline{T_{p_2}} \leq T_{p.\gamma_{EE}}\right), \quad (1)$$

for worst-case scenario equation (1) becomes:

$$\frac{\gamma}{100} = P\left(\overline{T_{p_1}} \geq T_{p.\gamma_{EE}}\right). \quad (2)$$

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Many publications are devoted to the problems of equipment's operating life evaluation. They review three main methods of operating life prediction – experimental, analytical and experimental-analytical. Experimental methods rely on operational life testing (usually, accelerated testing) [1]. experimental-analytical methods assume that dependability tests are performed for a part of equipment's composing elements (usually in place developed elements), and the technical equipment's operating life itself is calculated. Since there is no equipment to test on early stages of engineering and the equipment consists of elements with known durability characteristics, these methods won't be reviewed. The most widespread durability assessment methods are the methods of calculating mechanical equipment's operating life under cyclic stressing, mechanical wear and other fatiguing stresses. These methods are used in calculating operating life of separate elements of equipment's carcass [2], which is a separate problem and it will not be reviewed here. There are also operating life prediction methods based on using probability-physical failure patterns [3, 4]. But using these methods also requires experimental tests of the component base, so they haven't found much use in engineering routine.

© Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-4

Perhaps, the only document which regulates durability prediction on the stages of development is the standard [5], which is used ether directly (for example, [6]) or serves as a base for creating factory-local standards (for example, [7–9]).

Initial data for durability prediction using methods of this standard are the element's durability characteristics which are detailed and systematized in the handbook [10]. The handbook is an official publication and it gives a list of such experimentally obtained element's durability characteristics:

– gamma-percentile life;

– minimum operating time.

Fig. 1 shows a fragment of a Hand Book's table of resistor's durability characteristics.

However, minimum operating time values are detailed only for elements which have been produced under modern requirements. If an element is missing from the reference book, it has to be calculated using standard's [5] formula:

$$T_{н.м} = \frac{1-0{,}15\cdot\chi_{\gamma_1}}{1-0{,}15\cdot\chi_{\gamma}}\cdot T_{p.\gamma}. \qquad (3)$$

As implied by (3) methods of standard [5] assume that life of an element is a normally distributed random value:

$$f\left(t_p\right) = \frac{1}{\sigma\left(t_p\right)\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot\int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{-\left(t_p-m\left(t_p\right)\right)^2}{2\cdot\sigma\left(t_p\right)^2}}\,dt_p. \qquad (4)$$

Clearly, the number 0.15 in formula (3) represents variation coefficient of life:

$$\nu = \frac{\sigma\left(t_p\right)}{m\left(t_p\right)}. \qquad (5)$$

It should be noted that in the document [7] value of v is 0.25, and in the document [8] – 0.21.

On top of that each of those documents assumes that the value of v stays the same for every element when calculating durability characteristics. Therefore, if one elements has the same γ value as some another element, but one of the elements has greater $T_{p.\gamma}$ value, other durability characteristics ($T_{p.m}$ и $T_{н.м}$) will also be greater.

Dependability characteristics and reference data of individual types of resistors

Type products	d, pieces	$\lambda_б\cdot10^6$, 1/hour	$T_{н.м}$, in thousand hours	$T_{p.\gamma}$, in thousand hours (γ = 95%)	$T_{хр}$, year
Resistors, constant, non-conductor *Metal-dielectric (except for precision)*					
P1-1*	–	0,049	25 (in all modes by DS)	50 (in all modes by DS)	15
P1-2*	–		30 (in all modes by DS) 100 (t ≤ 60°C, P / $P_н$ = 1)	60 (in all modes by DS)	25
P1-3*	0		15 (in all modes by DS) 100 (t ≤ 60°C, P / $P_н$ = 1)	30 (in all modes by DS)	15
P1-5*	–		15 (in all modes by DS) 100 (t ≤ 60°C, P / $P_н$ = 1)	30 (in all modes by DS)	15
P1-8МП*	–		20 (in all modes by DS)	40 (in all modes by DS)	15
P1-9*	–		50 (in all modes by DS) for P1-9-40: 100 (t ≤ 85°C, P ≤ 16 Вт); for P1-9-50: 100 (t ≤ 85°C, P ≤ 25 Вт)	100 (in all modes by DS)	20
P1-10*	0		800 pulse P1-10-1 ÷ P1-10-7; 20 cycle P1-10-7, P1-10-8 (in all modes by DS)	1200 pulse P1-10-1÷ P1-10-7; 30 cycle P1-10-7, P1-10-8 (in all modes by DS)	15
P1-21*	–		6 (in all modes by DS)	12 (in all modes by DS) (γ = 90%)	12

Figure 1 – Hand Book "Nadyozhnost EhRI": part of a table with resistors' durability characteristics

© Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-4

Calculation of variation coefficient for different types of elements shows that v values lie in the range of 0.1÷0.25. As example, Fig. 2 shows distribution of the variation coefficient for the "Receiving and converting cathode-ray tubes" class.

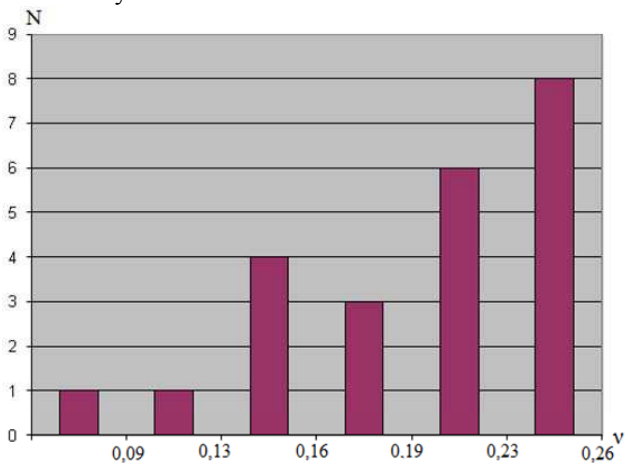


Figure 2 – Distribution of the variation coefficient diagram

So, if variation coefficients of life differ between elements, it can happen that one element has $T_{p.m}$ greater than another, and $T_{p.\gamma}$, in contrast, lesser.

To combat this, in [11] it has been suggested to use mean value of variation coefficient of life:

$$\nu_m = \frac{\sum_{n=1}^{N} \nu_n}{N}. \quad (6)$$

But neither documents [7, 8] nor monograph [11] detail evaluation of error, which is based on assumption of ν_n values equality.

Thus, one of the ways to increase durability prediction of equipment is using not determinate, but probabilistic characteristics of elements life.

3 MATERIALS AND METHODS

In order to resolve this problem a method of statistical modeling was used. This method is "a universal method of calculation for objects of any structure, for any distributions of operating time between failures and restoration times, for any strategies and methods of restoration and preventive maintenance…" [12].

In this case statistical modeling included following stages:

– Calculating parameters of the life distribution ($m(t_p)_n$ и $\sigma(t_p)_n$) using values of $T_{p.\gamma m}$, γ, $T_{н.мп}$ and γ_1 = 99.9% for each element (using normal distribution law).

– Performing simulation modeling:

– Calculating life realization for each element (using Box-Muller transform);

– Calculating life realization for equipment using limiting state criterion (K_{LS}). The limiting state criterion in standard [5] is interpreted as reaching operating life limit by a defined percentage of total count of equipment. Using this limiting state criterion for equipment's life realization means life realization's vector is aligned in ascending order. A value with number k is chosen from this vector:

$$\hat{t}_{p_{EE}} = \hat{t}_{p_k}, \quad (7)$$

where k is

$$k = \left[\frac{K_{LS}}{100} \cdot \mathrm{int}(N)\right] + 1. \quad (8)$$

Obviously, if the limiting state criterion is formulated as "reaching lifespan by any element", then, with this limiting state criterion:

$$\hat{t}_{p_{EE}} = \min_{n=1,N}\left(\hat{t}_{p_1}, \hat{t}_{p_2}, ..., \hat{t}_{p_N}\right). \quad (9)$$

– Carrying out simulation experiment and forming a vector of life realizations of electronic equipment

– Calculating γ-percentile life of electronic equipment. Aligning the vector of life realizations in descending order and selecting a value with number l from it:

$$T_{p.\gamma_{EE}} = \hat{t}_{p_l}, \quad (10)$$

where l is

$$l = \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) \cdot M. \quad (11)$$

This method was implemented and included in ASONIKA-K-D system of ASONIKA-K software package [13].

Fig. 3 shows results of modeling operating life of P1-1 resistor, which has $T_{н.м}$ = 25 thousand of hours, $T_{p.\gamma}$ = 50 thousand of hours (γ = 95%), amount of simulation experiments – 10^6.

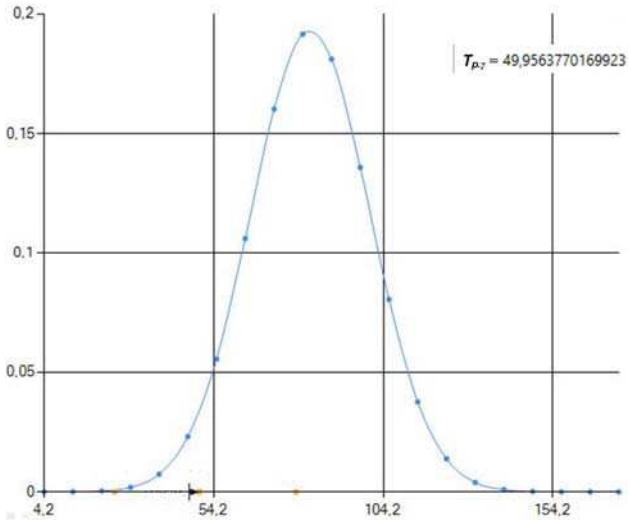


Figure 3 – Results of P1-1 resistor life modeling

© Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-4

As seen in Fig. 3, statistically modelled value of resistor's 95% operating life (49.956 thousands of hours) almost coincides with predetermined one.

4 EXPERIMENTS

To evaluate the influence of variation coefficient of life a number of calculations inside ASONIKA-K-D system was carried out.

Case 1. Equipment contains 5 elements with $T_{p.m} = 50$ thousands of hours ($\nu = 0.25$) and 5 elements with $T_{p.m} = 40$ thousands of hours ($\nu = 0.1$), $K_{LS} = 0\%$.

Case 2. Equipment contains 5 elements with $T_{p.m} = 50$ thousands of hours and 5 elements with with $T_{p.m} = 40$ thousands of hours, $K_{LS} = 0\%$. The variation coefficient for each element equals v_m, which is calculated using formula (6).

Case 3. Equipment contains 10 "P1-1" resistors (depicted in Fig. 1), $K_{LS} = 0\%$.

To evaluate the accuracy of calculations using a method described in standard [5], a 95% operating life calculation example was chosen.

The equipment consists of 101 resistors, 34 non-electrolytic capacitors, 28 electrolytic capacitors, 22 silicon diodes, 14 low-powered silicon transistors, 5 high-powered transistors, 37 microchips with low degree of integration, black and white kinescope and 2 low-frequency transformers.

limiting state criterion: "No more than 20% of elements should have their operating life used up".

Since standard [5] does not include types of elements, they were chosen match standard's [5] example. That means choosing elements in a way that makes the count of elements with 95% life's value to fit with the standard's [5] example. Formed data is summarized in Table 1.

5 RESULTS

Results of calculating 95% life's value for case 1 are shown in Fig. 4a. Calculations were performed using ASONIKA-K-D system with a number of simulation experiments $M = 10^6$.

Fig. 4 b shows Results of calculating 95% life's value for case 2.

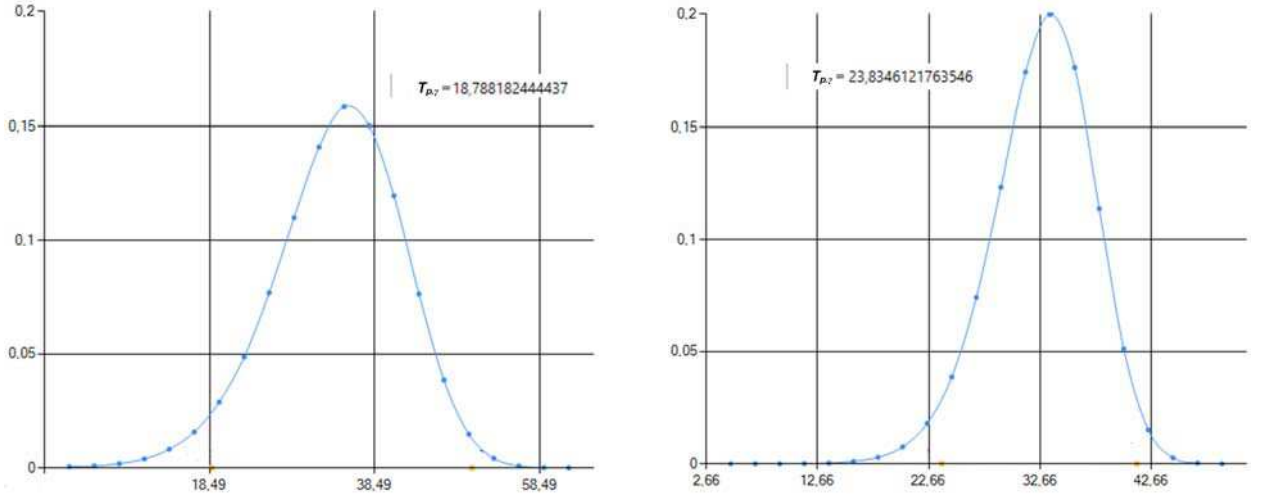
Results of calculating 95% life's value for case 1 are shown in Fig. 5. Calculations were performed with a number of simulation experiments $M = 10^6$.

Fig. 6a illustrates results of calculating 95% life's value calculated using ASONIKA-K-D system with a number of simulation experiments $M = 10^6$ for $K_{LS} = 20\%$. Fig. 6b shows results of calculating equipment's 95% life's value for $K_{LS} = 0\%$.

Table 1 – Initial data for calculating 95% life of equipment

№	Type products	$T_{н,м}$, in thousand hours	$T_{р,\gamma}$ ($\gamma = 95\%$), in thousand hours	Number of pieces	All pieces	Data [1]	
						$T_{p,\gamma}$ ($\gamma = 95\%$)	Total percentage
1	2	3	4	5	6	7	8
Ceramic capacitors for rated voltage 1600 V and higher					25	before 10000	**100**
1	К15-15	2	**5**	24			
Monochrome picture tubes							
2	2ЛК1Б	2	9 ($\gamma = 90\%$)	1			
Electrolytic capacitors					26	"15000	**89.6**
3	К50-20	10	**13**	1			
Thermoresistors							
4	КМТ-1	10	15 ($\gamma = 90\%$)	25			
Volumetric-porous capacitors					37	"20000	79
5	К52-2	10	15	27			
Ceramic capacitors for rated voltage 1600 V and higher							
6	К15-14в	7.5	15	10			
Resistors, constant, metal-dielectric					37	"30000	63.9
7	С2-6	15	25	35			
Low-voltage power transformers							
8	ТАН	12	27.5	2			
Integrated microcircuits					95	"50000	48.8
9	Hybrid	25	50	37			
Low-power silicon transistors							
10	2Т317А	25	50	14			
Silicon rectifier diodes							
11	Д214	25	50	22			
Powerful silicon transistors							
12	2Т808А	25	50	5			
Resistors, constant, metal-dielectric							
13	Р1-12	25	40	17			
Resistors, constant, metal-dielectric					24	"60000	9.9
14	Р1-4	30	60	24			
				Total:	244		

© Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-4



a b

Figure 4 – Simulation modeling results:
a – for values $v_{1–5} = 0.1$ and $v_{6–10} = 0.25$; b – for values $v_{1–10} = v_m = 0.175$

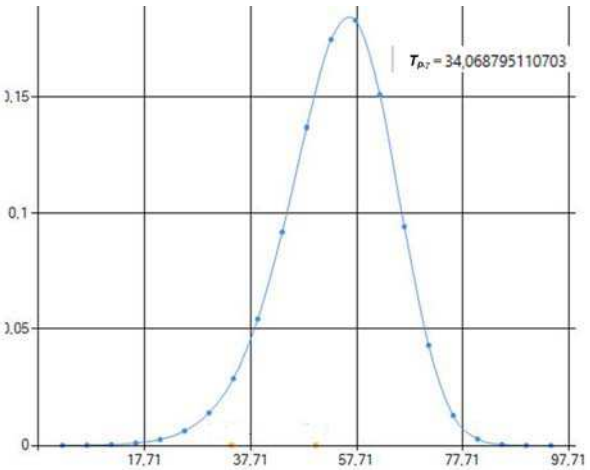
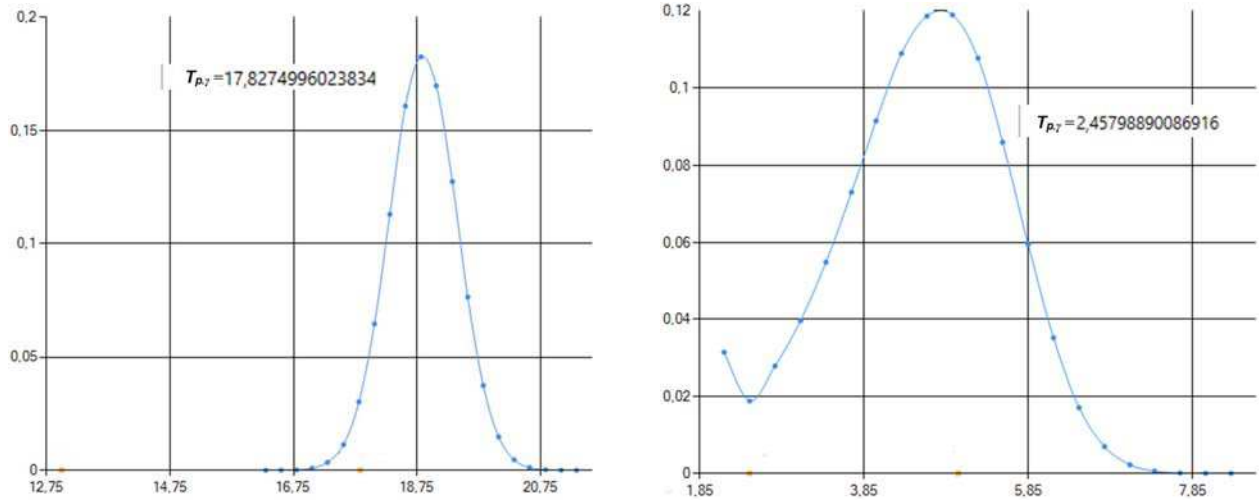


Figure 5 – Simulation modeling results for a unit with 10 resistors



a b

Figure 6 – Simulation modeling results:
a – for $K_{LS} = 20\%$; b – for $K_{LS} = 0\%$

© Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-4

6 DISCUSSION

To determine the cause of discrepancy between results of statistical modeling and standard's [5] example a test example was calculated (Fig. 4)

As Fig. 4a illustrates, the value of 95% life is equal to 18,788 thousands of hours. For comparison, Fig. 4b shows the value of 95% life of the same equipment with ν for each element equal to v_m, which is calculated using formula (6). As shown in Fig. 4b, the value of 95% life (23,834 thousands of hours) differs from the one with using different ν values as shown in Fig. 6a

However the calculated values are substantially lower than the value of 95% life calculated using standard's [5] method (33.42 thousands of hours)

A calculation of a test example was performed to identify the reason behind such results of statistical modeling (see Fig. 5). As illustrated in Fig. 5, the value of 95% life is equal to 34.068 thousands of hours, but standard's [5] result is 50 thousands of hours.

Since the v_n values in this case are same for all elements, this discrepancy is due to different elements' life values being independent random values.

When modeling independent random values (elements' lifes), for each element a random value is generated (x_1, x_2,…, x_N) and it's used to calculate the life's value (t_{p1}, t_{p2}, …,t_{pN}) as shown in Fig. 7.

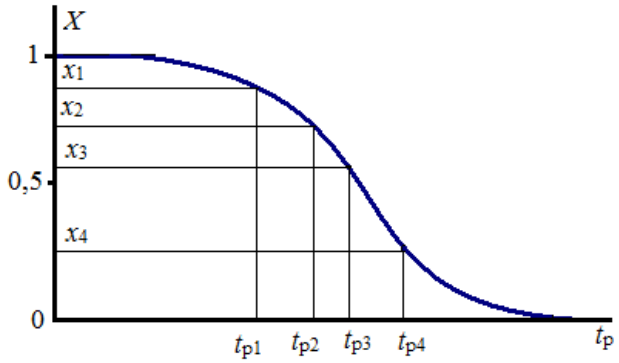


Figure 7 – Modeling of elements' lifes

Removing discrepancy between results of statistical modeling and standard's [5] method can be achieved by not only making v_n values equal, but also creating functional relation between elements of different types. That means if the first element's life realization equals to t_{p1} for a random value equal to x, then values of life realizations of other elements (t_{p1}, t_{p2}, …,t_{pN}) must be the same (illustrated in Fig. 8).

However, this is impossible in practice. It is hard to imagine skipping one type of element life verification but checking all of the others when building equipment. Specifically it has to be verification of elements life which would guarantee the element's life with probability close to 1.

Thus, if elements life are independent values, the probability of equipment's life being no lower than a certain value would decrease with increasing equipment's elements count.

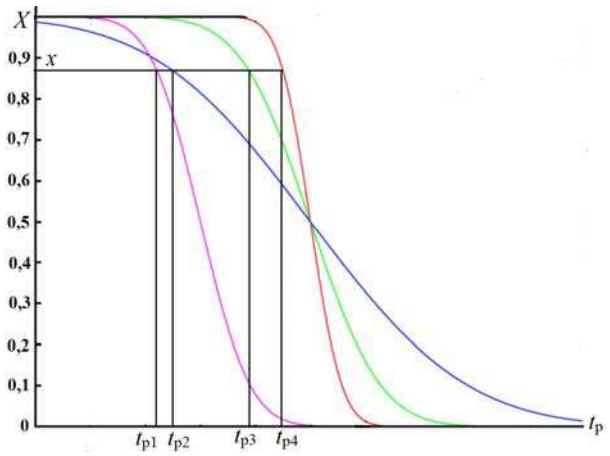


Figure 8 – Functional relation implemented by modeling elements' lifes realizations

This can lead to calculated value of 95% equipment's life being lower than the gamma-percentile life calculated using standard's [5] method. Minimum operating time would be lower too.

It should be noted that the value γ = 99.9% in formula (3) should be considered as an approximate one. Such value is recommended in standard [5] for calculating $T_{н.м}$ of elements with no $T_{н.м}$ values given in Data Sheet. By definition, minimum operating time is a time period (life) during which limiting state of an element won't happen with a probability of 1. Which means it should be considered as a shift parameter for life distribution function (Fig. 9).

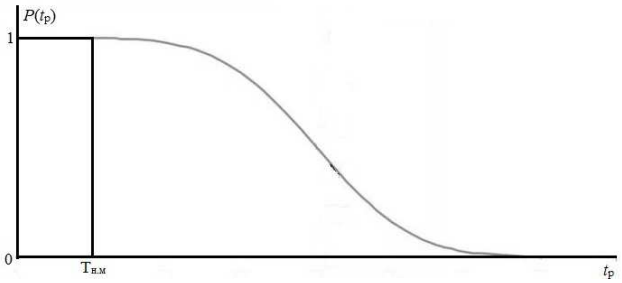


Figure 9 – Life distribution function

To confirm this, let's find $\chi_{\gamma 1}$ value using formula (3). In accordance with requirements of current standards, 95% element's life should be no lower than it's doubled minimum operating time. Let's assume $T_{p.\gamma} = 2 \bullet T_{н.м}$. In this case, formula (3) will take the following form:

$$T_{н.м} = \frac{1 - 0{,}15 \cdot \chi_{\gamma_1}}{1 - 0{,}15 \cdot 1{,}645} \cdot 2 \cdot T_{н.м}. \qquad (12)$$

Solving (12) for $\chi_{\gamma 1}$ gives $\chi_{\gamma 1}$ = 4,1568. For this value the probability is almost equal to 1 (at χ = 4.265 γ = 99.999%).

Based on this, it should be assumed that the element's life distribution function is shifted by $T_{н.м}$ value. In this

© Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-4

case, statistical modeling of element's life realization should be performed using formula:

$$\hat{t}_{p_n} = \begin{cases} \hat{t}_{p_n} = \hat{t}_{p_n},\ \hat{t}_{p_n} \geq T_{H.M_n}, \\ \hat{t}_{p_n} = T_{H.M_n},\ \hat{t}_{p_n} < T_{H.M_n}. \end{cases} \quad (13)$$

With taking into account all of the correction, statistical modeling was performed for standard's [5] example.

As illustrated in Fig. 6 a, 95% equipment's life is no lower than 17.827 thousands of hours, which is 1.4 times greater than the one calculated using standard's method (13 thousands of hours).

Besides, Fig. 6b shows results of calculating 95% equipment's life for K_{LS} = 0%. Fig. 7 b shows that 95% equipment's life is no lower than 2.457 thousands of hours, which is 2 times less than the one calculated using standard's [5] method (5 thousands of hours).

It should be noted that existence of reserved elements (reserving using additional (reserve) elements) should be taken into consideration when modeling equipment's life realizations.

For example, limiting state criterion for constantly loaded reservation is formulated as "Expending operating life of 100% of elements included in reserved group". K_{LS} value for such reserved group will be equal to:

$$K_{LS_g} = 100\% .$$

Calculating realizations of reserved group for such K_{LS} value is performed using following formula:

$$\hat{t}_{p_g} = \max_{n=\overline{1,N_g}} \left(\hat{t}_{p_1}, \hat{t}_{p_2}, ..., \hat{t}_{p_{N_g}} \right). \quad (14)$$

CONCLUSIONS

Thus, performed studies and analytical experiments allow us to draw the following conclusions:

– value of minimum operating time as a minimum of integral element's minimum operating time can be used for "lowest" estimation of gamma-percentile life of non-reserved equipment;

– standard's [5] method of calculating equipment's durability is applicable for calculating gamma-percentile life only if it's proven that lifes of integral elements have strong correlative connection and equal variation coefficients;

– statistical modeling is the most reasonable way of analytical gamma-percentile life calculation only if life of integral elements are independent random values with different parameters of their distributions;

– laws of life distribution with shift parameters equal to the minimal operating time should be used for modeling element's life realizations;

– existence of reserved elements (reserving using additional (reserve) elements) should be taken into consideration when modeling equipment's life realizations.

– specialized software should be used to calculate gamma-percentile life of equipment (like ASONIKA-K-D).

In conclusion, it should be noted that aforementioned method of statistical modeling does not take into consideration elements' life dependence from equipment's operation model. Particularities of predicting life of elements whose total flow of failures consists of independent failure flows of its components. These problems are reviewed in detail in [11] and [14]. Their suggested models will be implemented with ASONIKA-K-D further development.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research carried out in 2015 was supported by "The National Research University 'Higher School of Economics' Academic Fund Program" grant (№ 15-05-0029).

REFERENCES

1. Piganov M. N. Ispytaniya ehlektronnyh sredstv specialnogo naznacheniya [elektronnyj resurs]: elektron. ucheb. posobie. Samara, Samar. gos. aehrokosm. un-t im. S. P. Koroleva (nac. issled. un-t), 2012. elektron. tekstovye i graf. dan. (1,86 Mbajt). 1 ehl. opt. disk (CD-RW).
2. Talickij E. N. Zashchita ehlektronnyh sredstv ot mekhanicheskih vozdejstvij. Vladimir, Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2001, 256 p.
3. Druzhinin G. V. Nadezhnost avtomatizirovannyh sistem. Moscow, Energiya, 1977, 536 p.
4. Strelnikov V. P. Veroyatnostno-fizicheskie metody issledovaniya nadezhnosti mashin i apparatury, *Nadezhnost i kontrol kachestva*, 1989, No. 9, pp. 3–7.
5. Apparatura radioehlektronnaya. Opredelenie pokazatelej dolgovechnosti: OST 4.012.013-84 [Vveden 1985-07-01]. Moscow, VNII, 1985, 14 p. (Otraslevoj standart).
6. Sistema menedzhmenta kachestva. Proektirovanie i razrabotka. Poryadok vypolneniya i metodiki raschyot nadyozhnosti na stadii razrabotki: STO OmGTU 73.03-2012 [Vveden 2012-11-26]. Omsk, OmGTU, 2012, 49 p. (Standart universiteta).
7. Metodika ocenki srednego sroka sluzhby izdelij raschyotnym metodom: E10.012.054-87, [Vveden 1987-01-01]. Moscow, VNII, 1987, 20 p. (Normativnyj dokument).
8. Standart predpriyatiya. Metodika rascheta pokazatelej nadezhnosti radioehlektronnoj apparatury: STP YuFKV.025-2004 [Vveden 2004-05-18]. Moscow, NTC Modul, 2004, 31 p. (Standart predpriyatiya).
9. Standart predpriyatiya. Sistema upravleniya kachestvom razrabotok izdelij. Apparatura fizicheskih izmerenij. Apparatura i kompleksy apparaturnye. Raschyot pokazatelej nadyozhnosti i sostava ZIP: STPS 101-85 (izm. 2000), [Vveden 2000-12-12]. Moscow, NIIT, 2000, 63 p. (Standart predpriyatiya).
10. Nadyozhnost EhRI: Spravochnik. Moscow, MO RF, 2006, 641 p.
11. Zhadnov V. V. Raschyot nadezhnosti ehlektronnyh modulej: nauchnoe izdanie. Moscow, «Solon-Press», 2016, 232 p.
12. Nadyozhnost v tekhnike. Raschyot nadyozhnosti. Osnovnye polozheniya: GOST 27.301-95 [Vveden 1997-01-01]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov, 1995, 16 p. (Gosudarstvennyj standart Rossijskoj Federacii).

© Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-4

13. Iofin A., Zhadnov V. Comparative characteristics of the PC ASONIKA-K and reliability calculations programs, *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014, Dedicated to the 170th Anniversary of Lviv Polytechnic National University*. Lviv, National University "Lviv Polytechnic", 2014, pp. 226–228.

14. Ivanov I., Korolev P., Polesskiy S., Zhadnov V.V. The Design Procedure of Specified Operating Life of Fiber-optic Cables, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 2 (37), pp. 7–14.

Received 19.03.2018.
Accepted 12.06.2018.

УДК 621.396.6, 621.8.019.8

МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Жаднов В. В. – канд. техн. наук., доцент, професор Департаменту електронної інженерії Національного дослідницького університету «Вища школа економіки», Москва, Росія.

Кулигін В. Н. – магістр техніки і технологій, аспірант Аспірантської школи з технічних наук Національного дослідницького університету «Вища школа економіки», Москва, Росія.

Зотов А. Н. – магістр техніки і технологій, аспірант Аспірантської школи з технічних наук Національного дослідницького університету «Вища школа економіки», Москва, Росія.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Постійне підвищення вимог до строків активного існування космічних апаратів вимагає створення електронних засобів, що відповідають цим вимогам. З цієї точки зору саме показники довговічності дозволяють оцінити принципову можливість створення електронних засобів тривалого функціонування. На ранніх етапах проектування для оцінки показників довговічності застосовуються розрахункові методи. Очевидно, що чим точніше оцінка, тим більша ймовірність того, що при випробуваннях зразків показники довговічності будуть підтверджені. Тому вдосконалення інженерних методик оцінки показників довговічності електронних засобів є актуальним завданням.

Мета роботи. Підвищення якості проектних робіт за рахунок вдосконалення інженерних методик розрахунку ресурсу електронних засобів, що дозволяють підвищити точність і достовірність його оцінки.

Метод. Для розрахунку ресурсу електронних засобів застосований метод статистичного моделювання (метод Монте-Карло), що дозволяє враховувати імовірнісні характеристики ресурсу комплектуючих елементів.

Результати. Розв'язана задача прогнозування ресурсу електронних засобів на основі довідкових даних про характеристиках довговічності елементів на ранніх етапах проектування. Проведено аналіз стандартизованого методу розрахунку показників довговічності і виявлення істотні обмеження цього методу при прогнозуванні ресурсу електронних модулів. Запропоновано альтернативний метод прогнозування ресурсу електронних модулів, заснований на статичному моделюванні, і створена його програмна реалізація. Проведено тестування розробленого програмного забезпечення. Проведено обчислювальні експерименти з дослідження достовірності запропонованого методу і його порівняння із стандартизованим методом.

Висновки. За результатами проведених експериментів показано, що стандартизований метод можна застосовувати тільки для розрахунку мінімального напрацювання і зроблено висновок про необхідність врахування параметра усічення розподілу ресурсу елементів і коефіцієнта варіації ресурсу, а також особливостей схеми розрахунку надійності при прогнозування показників довговічності електронних засобів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електронний засіб, надійність, довговічність, ресурс, автоматизація проектування, імітаційне моделювання.

УДК 621.396.6, 621.8.019.8

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Жаднов В. В. – канд. техн. наук, доцент, профессор Департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия.

Кулыгин В. Н. – магистр техники и технологий, аспирант Аспирантской школы по техническим наукам Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия.

Зотов А. Н. – магистр техники и технологий, аспирант Аспирантской школы по техническим наукам Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Постоянное повышение требований к срокам активного существования космических аппаратов требует создания электронных средств, отвечающих этим требованиям. С этой точки зрения именно показатели долговечности позволяют оценить принципиальную возможность создания электронных средств длительного функционирования. На ранних этапах проектирования для оценки показателей долговечности применяются расчетные методы. Очевидно, что чем точнее оценка, тем больше вероятность того, что при испытаниях образцов показатели долговечности будут подтверждены. Поэтому совершенствование инженерных методик оценки показателей долговечности электронных средств является актуальной задачей.

Цель. Повышение качества проектных работ за счет совершенствование инженерных методик расчета ресурса электронных средств, позволяющих повысить точность и достоверность его оценки.

© Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-4

Метод. Для расчета ресурса электронных средств применен метод статистического моделирования (метод Монте-Карло), позволяющий учитывать вероятностные характеристики ресурса комплектующих элементов.

Результаты. Решена задача прогнозирования ресурса электронных средств на основе справочных данных о характеристиках долговечности элементов на ранних этапах проектирования. Проведен анализ стандартизованного метода расчета показателей долговечности и выявленные существенные ограничения этого метода при прогнозировании ресурса электронных модулей. Предложен альтернативный метод прогнозирования ресурса электронных модулей, основанный на статическом моделировании и создана его программная реализация. Проведено тестирование разработанного программного обеспечения. Проведены вычислительные эксперименты по исследованию достоверности предложенного метода и его сравнение со стандартизованным методом.

Выводы. По результатам проведенных экспериментов показано, что стандартизованный метод применим только для расчета минимальной наработки и сделан вывод о необходимости учета параметра усечения распределения ресурса элементов и коэффициента вариации ресурса, а также особенностей схемы расчета надежности при прогнозирования показателей долговечности электронных средств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электронное средство, надежность, долговечность, ресурс, автоматизация проектирования, имитационное моделирование.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Пиганов М. Н. Испытания электронных средств специального назначения [электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / М. Н. Пиганов. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2012. – Электрон. текстовые и граф. дан. (1,86 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-RW).
2. Талицкий Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий / Е. Н. Талицкий. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2001. – 256 с.
3. Дружининин Г. В. Надежность автоматизированных систем / Г. В. Дружининин. – М. : Энергия, 1977. – 536 с.
4. Стрельников В. П. Вероятностно-физические методы исследования надежности машин и механизмов / В. П. Стрельников // Надежность и контроль качества. – 1989. – № 9. – С. 3–7.
5. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности : ОСТ 4.012.013-84. – Введ. 1985-07-01. – М. : ВНИИ, 1985. – 14 с.
6. Система менеджмента качества. Проектирование и разработка. Порядок выполнения и методики расчет надежности на стадии разработки : СТО ОмГТУ 73.03-2012. – Введ. 2012-11-26. – Омск : ОмГТУ, 2012. – 49 с.
7. Методика оценки среднего срока службы изделий расчетным методом : Е10.012.054-87. – Введ. 1987-01-01. – М. : ВНИИ, 1987. – 20 с.
8. Методика расчета показателей надежности радиоэлектронной аппаратуры : СТП ЮФКВ.025-2004. – Введ. 2004-05-18. – М. : НТЦ Модуль, 2004. – 31 с.
9. Система управления качеством разработок изделий. Аппаратура физических измерений. Аппаратура и комплексы аппаратурные. Расчет показателей надежности и состава ЗИП : СТПС 101-85 (изм. 2000). – Введ. 2000-12-12. – М. : НИИТ, 2000. – 63 с.
10. Надежность ЭРИ: Справочник – М. : МО РФ, 2006. – 641 с.
11. Жаднов В. В. Расчет надежности электронных модулей: научное издание / В. В. Жаднов. – М. : «Солон-Пресс», 2016. – 232 с.
12. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения: ГОСТ 27.301-95. – Введ. 1997-01-01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1995. – 16 с.
13. Iofin A. A. Comparative characteristics of the PC ASONIKA-K and reliability calculations programs / A. A. Iofin, V. V Zhadnov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014, Dedicated to the 170th Anniversary of Lviv Polytechnic National University. – Lviv : National University «Lviv Polytechnic», 2014. – P. 226–228.
14. The Design Procedure of Specified Operating Life of Fiber-optic Cables / I. A. Ivanov, P. S. Korolev, S. N. Polesskiy, V. V. Zhadnov // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2016. – № 2 (37). – P. 7–14.

© Zhadnov V. V., Kulygin V. N., Zotov A. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-4

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

UDC 517.968.21

POLYNOMIAL SOLUTIONS FOR THE KOLMOGOROV-WIENER FILTER WEIGHT FUNCTION FOR FRACTAL PROCESSES

Gorev V. N. – PhD, Assistant Professor of the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Gusev A. Yu. – PhD, Docent, Professor of the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

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

ABSTRACT

Context. We consider a Kolmogorov-Wiener filter for fractal random processes, which, for example, may take place in modern information-telecommunication systems and in control of complex technological processes. The weight function of the considered filter may be applied to data forecast in the corresponding systems.

Objective. As is known, in the continuous case the Kolmogorov-Wiener filter weight function obeys the Fredholm integral equation of the first kind. The aim of the work is to obtain the Kolmogorov-Wiener filter weight function as an approximate solution of the corresponding integral equation.

Method. The truncated orthogonal polynomial expansion method for approximate solution of the Fredholm integral equation of the first kind is used. A set of orthonormal polynomials is used.

Results. We obtained approximate results for the Kolmogorov-Wiener weight function for fractal processes with a power-law structure function. The weight function is found as an approximate solution of the Fredholm integral equation of the first kind the kernel of which is the correlation function of the corresponding fractal random process. Analytical results for the one-, two-, three-, four- and five-polynomial approximations are obtained. A numerical comparison of the left-hand and right-hand sides of the integral equation for the obtained weight functions is given for different values of the parameters. The corresponding numerical investigation is made up to the 18-polynomial approximation on the basis of the Wolfram Mathematica package. The applicability of the obtained solutions is discussed.

Conclusions. The Kolmogorov-Wiener weight function for fractal processes is obtained approximately in the form of a truncated orthogonal polynomial series. The validity of the obtained weight functions is discussed. The obtained results may be applied to the data forecast in a wide variety of different systems where fractal random processes take place.

KEYWORDS: Kolmogorov-Wiener filter weight function, truncated orthogonal polynomial expansion, Fredholm integral equation of the first kind, approximate solution.

NOMENCLATURE

T – time interval along which the input data are observed

k – time interval for which the forecast should be made

$h(t)$ – Kolmogorov-Wiener filter weight function

H – Hurst exponent

$S_n(t)$ – set of orthonormal polynomials in $t \in [0, T]$.

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

σ^2 process variance

INTRODUCTION

Nowadays fractal processes take place in a huge variety of different systems (see, for example, [1–4] and various references in [4]). This paper is devoted to the obtaining of the Kolmogorov–Wiener filter weight function for continuous fractal processes. The structure function of the corresponding random fractal process is supposed to be a power-law one. Such a model is widely used for description of different systems in different fields of knowledge; see, for example, [5] and references therein.

© Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-5

In paper [4] the problem of data forecast for fractal processes in telecommunication systems was considered on the basis of Kolmogorov-Wiener filter. The results of paper [4] were refined in [5], but the Volterra integral equation was considered in [4, 5] rather than the Fredholm one. As is known [6], in the general case for such a problem the Fredholm integral equation of the first kind should be used. The exact analytical solution for such equation meets difficulties, so an approximate solution of the corresponding integral equation is obtained in this paper.

The object of study is the Kolmogorov-Wiener filter for continuous fractal processes.

The subject of study is the weight function of the corresponding filter.

The aim of the work is to obtain the corresponding weight function as an approximate solution of the Fredholm integral equation of the first kind.

1 PROBLEM STATEMENT

We consider the Kolmogorov-Wiener filter for continuous fractal processes. As is known, the weight function of the considered filter obeys the following integral equation

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

where T is the time interval along which the input data are observed, $k \ll T$ the time interval for which the forecast should be made, $h(\tau)$ is the Kolmogorov-Wiener filter weight function and $R(t)$ is the correlation function of the corresponding fractal process, the noiseless case is considered. Here we consider a random fractal process with the power-law structure function which leads to the following correlation function [5]

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

where σ^2 is the process variance, α is a constant and H is the Hurst exponent. The statement of the problem is to obtain the weight function $h(\tau)$ as an approximate solution to the integral equation (1).

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Nowadays fractal processes are used for the description of a huge variety of different systems, and a model with a power-law structure function is a popular model of the fractal process, (see, for example, [1–5] and references therein).

In paper [4] the Kolmogorov-Wiener filter is proposed in order to make the forecast for the fractal traffic which takes place in some telecommunication systems. Such a traffic is rather data-intensive, that is why for convenience it is described as a continuous process in [4].

But in [4] the Volterra integral equation of the first kind is used rather than the Fredholm one. In [4] the method of solution of the corresponding Volterra integral equation is described and finally an exact analytical solution of this equation was obtained in [5]. It should be stressed that the Volterra integral equation is not so complicated as the Fredholm one and it admits an exact analytical solution. Maybe, in some cases the use of the Volterra equation instead of the Fredholm one is a reasonable simplification. But definitely in the general case one should use the Fredholm integral equation of the first kind rather than the Volterra one, see, for example, [6]. So the aim of the paper is to solve the corresponding Fredholm equation.

But the exact analytical solution of the Fredholm integral equation (1) meets difficulties, so here we restrict ourselves only to a search for an approximate solution of (1).

It should be stressed that Fredholm integral equations of the first kind take place in various fields of knowledge. One of the most popular methods of their approximate solution, which is used in this paper, is the expansion of the unknown function into a truncated orthogonal polynomial series, see the corresponding solution of the kinetic equation in the framework of statistical physics [7, 8]. In fact, this method is a special case of the Galerkin's method described in [9].

3 MATERIALS AND METHODS

The solution of eq, (1) is sought as the orthogonal polynomials series

$$h(t) = \sum_n g_n S_n(t) \qquad (3)$$

where $S_n(t)$ a set of polynomials which are orthonormal in $t \in [0,T]$ and g_n are unknown coefficients.

The polynomials $S_n(t)$ are constructed as follows. As is known [10], the polynomials $S_n'(t)$ orthogonal in $t \in [0,T]$ can be constructed as follows:

$$S_n'(\tau) = \begin{vmatrix} \mu_0 & \mu_1 & \mu_2 & \cdots & \mu_n \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 & \cdots & \mu_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n-1} & \mu_n & \mu_{n+1} & \cdots & \mu_{2n-1} \\ 1 & \tau & \tau^2 & \cdots & \tau^n \end{vmatrix}, \quad \tau \in [0,T] \qquad (4)$$

where

$$\mu_n = \int_0^T x^n dx = \frac{T^{n+1}}{n+1}. \qquad (5)$$

© Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-5

The numerical values of $S_n'(t)$ for $t \approx T$ may be rather large, that is why the use of the orthonormal polynomials $S_n(t)$ may be convenient:

$$S_n(\tau) = \frac{S_n'(\tau)}{\sqrt{\int_0^T dt \left(S_n'(t)\right)^2}}, \tag{6}$$

the polynomials (6) obey the property

$$\int_0^T dt S_n(t) S_m(t) = \delta_{mn} \tag{7}$$

where δ_{mn} is the Kronecker delta.

By a straightforward calculation on the basis of (4)–(6) one can obtain explicit expressions for the first 5 polynomials:

$$\begin{gathered} S_0(t) = \frac{1}{\sqrt{T}},\ S_1(t) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{T}}\left(\frac{2}{T}t - 1\right), \\ S_2(t) = \frac{\sqrt{5}}{T^{1/2}}\left(\frac{6}{T^2}t^2 - \frac{6}{T}t + 1\right), \\ S_3(t) = \frac{\sqrt{7}}{T^{1/2}}\left(-1 + \frac{12}{T}t - \frac{30}{T^2}t^2 + \frac{20}{T^3}t^3\right), \\ S_4(t) = \frac{3}{T^{1/2}}\left(1 - \frac{20}{T}t + \frac{90}{T^2}t^2 - \frac{140}{T^3}t^3 + \frac{70}{T^4}t^4\right). \end{gathered} \tag{8}$$

On the basis of (3) one can rewrite (1) as

$$\sum_n g_n \int_0^T d\tau S_n(\tau) R(t-\tau) = R(t+k). \tag{9}$$

After multiplying (9) by $S_m(t)$ and integrating one can obtain

$$\sum_n g_n G_{mn} = b_m, \tag{10}$$

where

$$\begin{gathered} G_{mn} = \int_0^T dt \int_0^T d\tau S_n(\tau) S_m(t) R(t-\tau), \\ b_m = \int_0^T dt S_m(t) R(t+k), \end{gathered} \tag{11}$$

the quantities G_{mn} are called the integral brackets. The obtained set of linear equations (10) is infinite, and solving (10) meets difficulties. So one should artificially truncate (10):

$$\sum_{n=0}^{l-1} g_n G_{mn} = b_m,\ m = \overline{0, l-1}. \tag{12}$$

The set (12) is finite, and one can obtain the coefficients g_n as the solution of the set (12). The corresponding approximate solution of the integral equation (1)

$$h(\tau) = \sum_{n=0}^{l-1} g_n S_n(\tau) \tag{13}$$

is called the solution in the l-polynomial approximation. In matrix form (12) can be rewritten as

$$Gg = b \tag{14}$$

where

$$\begin{gathered} G = \begin{pmatrix} G_{00} & G_{10} & \cdots & G_{0j} \\ G_{01} & G_{11} & \cdots & G_{1j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{0j} & G_{1j} & \cdots & G_{jj} \end{pmatrix},\ j = l-1, \\ g = \begin{pmatrix} g_0 \\ g_1 \\ \vdots \\ g_j \end{pmatrix},\ b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_j \end{pmatrix}, \end{gathered} \tag{15}$$

so the coefficients g_n can the obtained in matrix form as

$$g = G^{-1} b. \tag{16}$$

Now let us consider the properties of the matrix G. First of all,

$$\begin{aligned} G_{mn} &= \int_0^T dt \int_0^T d\tau S_n(\tau) S_m(t) R(t-\tau) = \{t \leftrightarrow \tau\} = \\ &= \int_0^T d\tau \int_0^T dt S_n(t) S_m(\tau) R(\tau - t). \end{aligned} \tag{17}$$

The correlation function is an even one:

$$R(\tau - t) = R(t - \tau), \tag{18}$$

and on the basis of (17) we have

$$G_{mn} = \int_0^T d\tau \int_0^T dt S_m(\tau) S_n(t) R(\tau - t) = G_{nm}. \tag{19}$$

© Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-5

Also the polynomials (6) obey the property

$$S_n\left(\frac{T}{2}+t\right)=\begin{cases}S_n\left(\frac{T}{2}-t\right), n\vdots 2\\ -S_n\left(\frac{T}{2}-t\right), n\nmid 2\end{cases},\ t\in\left[0,\frac{T}{2}\right]. \qquad (20)$$

Let us consider the quantity G_{nm} where m and n are of different evenness. On the basis of (11) and (18) we have

$$\begin{aligned}G_{mn}&=\int_0^T dt\int_0^T d\tau S_m(t)S_n(\tau)R(t-\tau)=\\&=\left\{x=\frac{T}{2}-t, y=\frac{T}{2}-\tau\right\}=\\&=\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}dx\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}dyS_m\left(\frac{T}{2}-x\right)S_n\left(\frac{T}{2}-y\right)R(y-x)=\\&=\{y\to -y, x\to -x\}=\\&=\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}dx\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}dyS_m\left(\frac{T}{2}+x\right)S_n\left(\frac{T}{2}+y\right)R(y-x),\end{aligned} \qquad (21)$$

here the fact that the correlation function is even is used. On the basis of (20) and the fact that m and n are of different evenness, we have

$$S_m\left(\frac{T}{2}+x\right)S_n\left(\frac{T}{2}+y\right)=-S_m\left(\frac{T}{2}-x\right)S_n\left(\frac{T}{2}-y\right) \qquad (22)$$

and with account for (21) we have

$$\begin{aligned}G_{mn}&=\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}dx\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}dyS_m\left(\frac{T}{2}-x\right)S_n\left(\frac{T}{2}-y\right)R(y-x)=\\&=-G_{mn}\Rightarrow G_{mn}=0.\end{aligned} \qquad (23)$$

So the matrix G obeys the following properties:

1. G is a symmetrical matrix: $G_{mn}=G_{nm}$
2. $G_{mn}=0$ if m and n are of different evenness.

These properties allow one not to calculate all the matrix G by a straightforward calculation. It is enough to calculate by straightforward calculation only those components G_{mn} for which $m\ge n$ and m and n are of the same evenness.

By a straightforward calculation on the basis of (8) and (11) one can obtain the components of the matrix G up to G_{44}:

$$\begin{aligned}G_{00}&=\sigma^2T-\frac{\alpha}{2}\frac{1}{(2H+1)(H+1)}T^{2H+1},\\G_{11}&=\frac{\alpha}{2}\frac{3H}{(2H+1)(H+1)(H+2)}T^{2H+1},\\G_{22}&=-\frac{5}{3}\frac{H-1}{H+3}G_{11},\ G_{33}=-\frac{7}{5}\frac{H-2}{H+4}G_{22},\\G_{44}&=-\frac{9}{7}\frac{H-3}{H+5}G_{33},\\G_{20}&=-\frac{2\sqrt{5}\alpha H}{(2H+2)(2H+3)(2H+4)}T^{2H+1},\\G_{40}&=-\frac{\alpha}{2}\frac{24H(H-1)(2H-1)}{(2H+6)(2H+5)(2H+4)}\times\\&\times\frac{1}{(2H+3)(2H+2)}T^{2H+1},\\G_{42}&=-\frac{\alpha}{2}\frac{3\sqrt{5}H(H-1)(H-2)}{(H+1)(H+2)(H+3)}\times\\&\times\frac{1}{(H+4)(2H+3)}T^{2H+1},\\G_{31}&=\frac{\alpha}{2}\frac{\sqrt{21}H(H-1)}{(H+1)(H+2)(H+3)(2H+3)}T^{2H+1}.\end{aligned} \qquad (24)$$

On the basis of (11) and 8 the coefficients b_m are calculated up to b_4:

$$\begin{aligned}b_0&=\frac{1}{T^{1/2}}\left(\sigma^2T-\frac{\alpha}{2}J_1\right),\\b_1&=-\frac{\alpha}{2}\frac{\sqrt{3}}{T^{3/2}}\left(2J_2-(2k+T)J_1\right),\\b_2&=-\frac{\alpha}{2}\frac{\sqrt{5}}{T^{5/2}}\left[6J_3-(12k+6T)J_2+\right.\\&\left.+\left(6k^2+6kT+T^2\right)J_1\right],\\b_3&=-\frac{\alpha}{2}\frac{\sqrt{7}}{T^{7/2}}\left[-\left(T^3+12T^2k+30Tk^2+20k^3\right)J_1+\right.\\&\left.+12\left(T^2+5kT+5k^2\right)J_2-30(T+2k)J_3+20J_4\right],\\b_4&=-\frac{\alpha}{2}\frac{3}{T^{9/2}}\left[J_1\left(T^4+20kT^3+90k^2T^2+\right.\right.\\&\left.+140k^3T+70k^4\right)-20J_2\left(T^3+9kT^2+21k^2T+\right.\\&\left.+14k^3\right)+10J_3\left(9T^2+42kT+42k^2\right)-\\&\left.-140(T+2k)J_4+70J_5\right],\\J_n&=\frac{(T+k)^{2H+n}-k^{2H+n}}{2H+n}.\end{aligned} \qquad (25)$$

On the basis of (15), (16) and the above-mentioned properties of the matrix G one can obtain the following results:

© Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-5

$$h^{[1]}(t)=g_0^{[1]}S_0(t),\ g_0^{[1]}=g_0^{[2]}=\frac{b_0}{G_{00}},$$

$$h^{[2]}(t)=g_0^{[1]}S_0(t)+g_1^{[2]}S_1(t),\ \ g_1^{[2]}=g_1^{[3]}=\frac{b_1}{G_{11}},$$

$$h^{[3]}(t)=g_0^{[3]}S_0(t)+g_1^{[3]}S_1(t)+g_2^{[3]}S_2(t),$$

$$g_0^{[3]}=g_0^{[4]}=\frac{b_0G_{22}-b_2G_{20}}{G_{00}G_{22}-G_{20}^2},$$

$$g_2^{[3]}=g_2^{[4]}=\frac{b_0G_{20}-b_2G_{00}}{G_{20}^2-G_{00}G_{22}},$$

$$h^{[4]}(t)=g_0^{[4]}S_0(t)+g_1^{[4]}S_1(t)+g_2^{[4]}S_2(t)+$$
$$+g_3^{[4]}S_3(t),$$

$$g_1^{[4]}=g_1^{[5]}=\frac{b_1G_{33}-b_3G_{31}}{G_{11}G_{33}-G_{31}^2},$$

$$g_3^{[4]}=g_3^{[5]}=\frac{b_1G_{31}-b_3G_{11}}{G_{31}^2-G_{11}G_{33}},\qquad(26)$$

$$h^{[5]}(t)=g_0^{[4]}S_0(t)+g_1^{[4]}S_1(t)+g_2^{[4]}S_2(t)+$$
$$+g_3^{[4]}S_3(t)+g_4^{[5]}S_4(t),$$

$$g_4^{[5]}=\frac{\xi}{\eta},$$

$$\xi=\left(G_{22}G_{40}-G_{20}G_{42}\right)\left(b_0G_{40}-G_{00}b_4\right)-$$
$$-\left(b_2G_{40}-G_{20}b_4\right)\left(G_{20}G_{40}-G_{00}G_{42}\right),$$

$$\eta=\left(G_{22}G_{40}-G_{20}G_{42}\right)\left(G_{40}^2-G_{00}G_{44}\right)-$$
$$-\left(G_{20}G_{40}-G_{00}G_{42}\right)\left(G_{42}G_{40}-G_{20}G_{44}\right),$$

$$g_2^{[5]}=\frac{G_{40}b_2-G_{20}b_4-\left(G_{40}G_{42}-G_{20}G_{44}\right)g_4^{[5]}}{G_{40}G_{22}-G_{20}G_{42}},$$

$$g_0^{[5]}=\frac{b_4}{G_{40}}-\frac{G_{42}}{G_{40}}g_2^{[5]}-\frac{G_{44}}{G_{40}}g_4^{[5]},$$

where explicit expressions for G_{mn}, b_m and $S_n(t)$ are given in (24), (25) and (8), respectively, and the superscript $[n]$ denotes that the corresponding quantity is taken in the n-polynomial approximation. The approximations of a larger number of polynomials are investigated in this paper only numerically because the corresponding analytical expressions are too cumbersome.

4 EXPERIMENTS

As is known, the above-mentioned method of truncated polynomial expansion is convergent if the kernel of the corresponding integral equation is positively defined function (see, for example, a similar discussion for the solution of kinetic equations in electron-phonon systems in [11]). The kernel of the integral equation (1) is the correlation function (2), which is not a positively defined function, so the proposed method is not necessarily convergent for all the parameters. So the obtained solutions should be checked at different numerical values of the parameters, and the aim of this section is to answer the question for which parameters the proposed method is reliable.

Let us take the following parameters:

$$T=100,\ k=3,\ \sigma=1.2,\ H=0.8,\ \alpha=\pi/2\qquad(27)$$

and compare numerically the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for the obtained weight functions (26). The corresponding numerical calculation is made in Wolfram Mathematica 11 package. The corresponding graphs for one-, two-, three-, four- and five-polynomial approximations are given in Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 and Fig. 5, respectively:

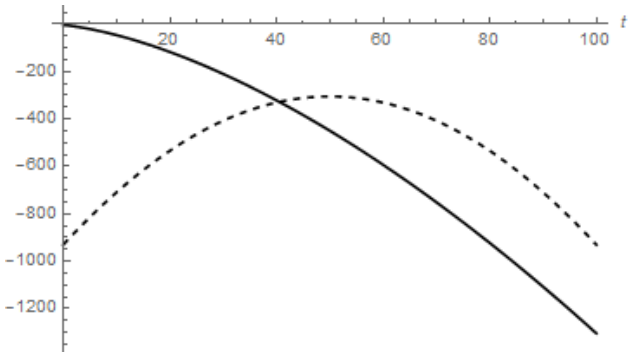


Figure 1 – Comparison the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for parameters (27) for the one-polynomial approximation

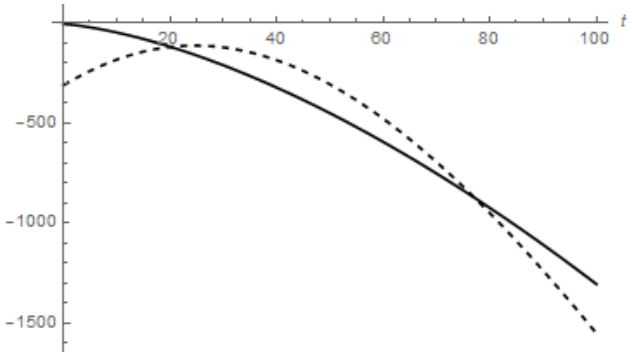


Figure 2 – Comparison the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for parameters (27) for the two-polynomial approximation

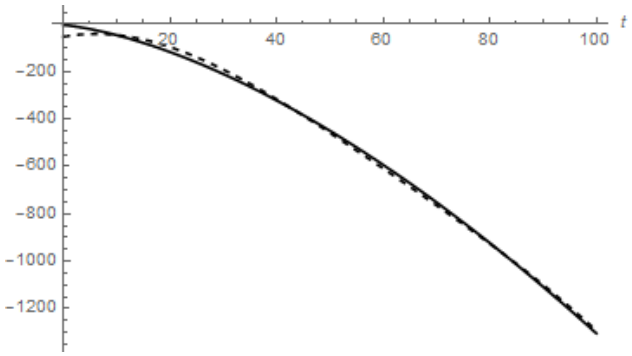


Figure 3 – Comparison the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for parameters (27) for the three-polynomial approximation

© Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-5

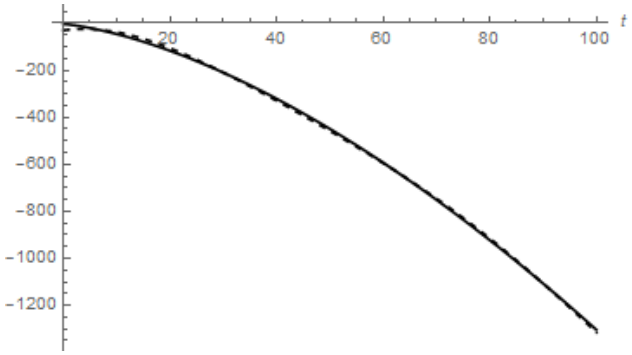


Figure 4 – Comparison the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for parameters (27) for the three-polynomial approximation

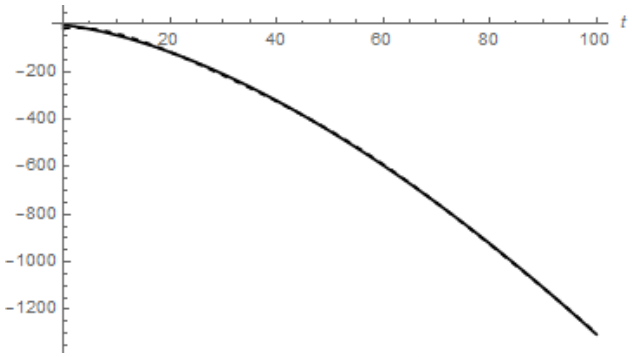


Figure 5 – Comparison the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for parameters (27) for the three-polynomial approximation

It should be stressed that the left-hand side of (1) is calculated numerically on the basis of Wolfram Mathematica as

$$\int_0^T d\tau h(\tau) R(t-\tau) = \int_0^T d\tau h(\tau)\left(\sigma^2 - \frac{\alpha}{2}|t-\tau|^{2H}\right) = \\ = \int_0^t d\tau h(\tau)\left(\sigma^2 - \frac{\alpha}{2}(t-\tau)^{2H}\right) + \\ + \int_t^T d\tau h(\tau)\left(\sigma^2 - \frac{\alpha}{2}(\tau-t)^{2H}\right). \qquad (28)$$

As can be seen from the figures, the one-polynomial approximation is not quite accurate, but the accuracy of the obtained solution increases with the number of polynomials, and the three-polynomial approximation is already rather accurate. For the five-polynomial approximation the obtained curves are very close to each other. Approximations of a larger number of polynomials are made numerically in Wolfram Mathematica up to the 18-polynomial approximation. It should be stressed that Mathematica is not able to calculate the approximation of higher-than-18 polynomials adequately due to machine errors (the corresponding «ripple» can be seen on the graphs). A rather strange behavior of n-polynomial approximation solutions is obtained: for $1 \le n \le 8$ the accuracy increases, and for $n = 7$ and $n = 8$ the curves are in fact ideally identical. For $9 \le n \le 15$ the method fails – the left-hand and right-hand sides of (1) are totally different. But for $16 \le n \le 18$ the method is again very good and the curves are in fact ideally identical. Such a strange behavior can hardly be explained. Maybe the reason is that the kernel of the integral equation (1) is not a positively defined function and the convergence of the method is not guaranteed. But nevertheless it should be stressed that for parameters (27) and for $3 \le n \le 8$ the method works really good and the obtained solutions for the weight function give the good coincidence of the left-hand and right-hand sides of eq. (1).

Then let us change the parameters. The most interesting change is the change of the parameter T because this parameter may vary most significantly in real systems. So let us take the parameters

$$T = 10,\ k = 3,\ \sigma = 1.2,\ H = 0.8,\ \alpha = \pi/2. \qquad (29)$$

For parameters (29) the corresponding investigation is also made up to the 18-polynomial approximation, and it seems that for parameters (29) the method is really convergent. The accuracy increases with the number of polynomials, the three-polynomial approximation is already rather accurate, for the five-polynomial approximation the obtained curves are very close to each other and starting from $n = 8$ the curves are in fact ideally identical.

Another set of parameters which is investigated in the paper is the following:

$$T = 1000,\ k = 3,\ \sigma = 1.2,\ H = 0.8,\ \alpha = \pi/2. \qquad (30)$$

For this set of parameters the method is not convergent. For $1 \le n \le 4$ the accuracy increases and for $n = 3$ and $n = 4$ the coincidence of the curves is rather good. But starting from $n = 5$ the method begins to fail, and the accuracy decreases with the number of polynomials for $n \ge 5$. The corresponding comparisons of the left-hand and right-hand sides of (1) for the four- and five-polynomial approximation are given in Fig. 6 and Fig. 7, respectively.

But, as can be seen, the four-polynomial approximation gives a really good coincidence of the curves. So, although the method is not convergent for parameters (30), the four-polynomial approximation gives a good approximate solution for the weight function.

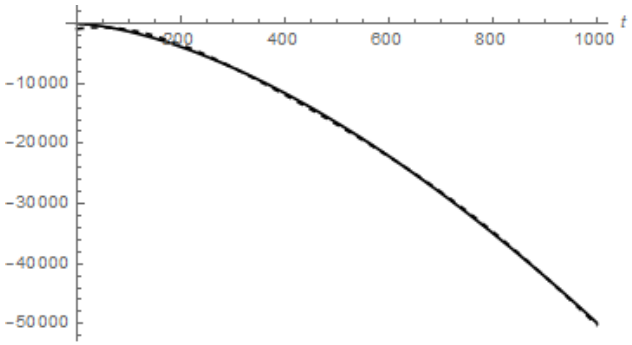


Figure 6 – Comparison the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for parameters (30) for the four-polynomial approximation

© Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-5

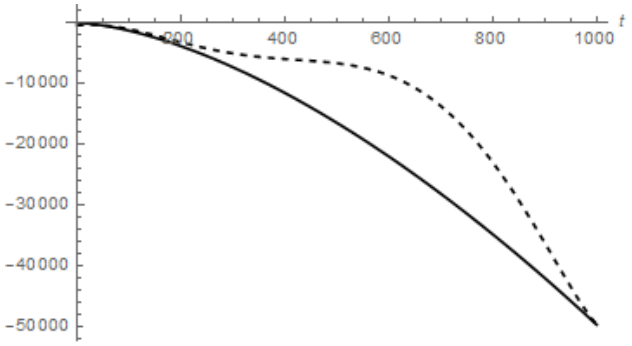


Figure 7 – Comparison the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for parameters (30) for the five-polynomial approximation

It should be stressed that, strictly speaking, the correlation function should obey the property

$$\left|R(t)\right| \le R(0), \qquad (31)$$

so the considered parameters may not be physical. But if, for example, we change the parameter α in such a way that $R(t)$ obeys (31), the situation does not change significantly; anyway, the situation does not become better.

If, for example, we take $\alpha = 3\cdot 10^{-3}$ rather than $\alpha = \pi/2$ in (27), we have the following behavior of n-polynomial approximations. The one-polynomial approximation is not accurate, for the two-polynomial approximation the curves on the corresponding graphs are very close to each other. The three and four-polynomial approximation give approximately the same pictures. They are worse than the two-polynomial approximation, but better than the one-polynomial approximation. But the five-polynomial approximation gives almost identical curves, and for $5 \le n \le 18$ the qualitative behavior of the solutions is the same as for parameters (27).

If, for example, we take $\alpha = 10^{-1}$ rather than $\alpha = \pi/2$ in (29), we have the following behavior of n-polynomial approximations. The one-polynomial approximation is not accurate, the two-polynomial approximation is much better than the one-polynomial one, and for $2 \le n \le 6$ the accuracy slowly increases with the number of polynomials. The accuracy of the 7-polynomial approximation is lower than that of 6-polynomial approximation, but for $7 \le n \le 10$ the accuracy slowly increases with the number of polynomials. For $11 \le n \le 17$ the accuracy increases with the number of polynomials and the curves on the corresponding graphs are very close to each other. Mathematica is not able to calculate the approximations of more than 17 polynomials adequately due to machine errors (the corresponding «ripple» can be seen on the graphs).

If, for example, we take $\alpha = 8\cdot 10^{-5}$ rather than $\alpha = \pi/2$ in (30), we have the following behavior of n-polynomial approximations. The one-polynomial approximation is not accurate, but the two-polynomial approximation is rather accurate: the curves in the corresponding graphs are very close to each other. For $n \ge 3$ the accuracy of the result decreases with the number of polynomials, starting from $n = 5$ the curves are far from each other.

5 RESULTS

The method of truncated orthogonal polynomial expansion is proposed in order to solve the integral equation (1). Analytical expressions for a one-, two-, three-, four- and five-polynomial approximation solutions are obtained.

The kernel of this integral equation is not a positively defined function, so the method may not be convergent, in other words, the accuracy of the obtained solution may not increase with the number of polynomials. But in a rather wide range of parameters the approximations of rather small number of polynomials are rather accurate and may be applied to the following investigation of the data forecast. Moreover, for some parameters the method is convergent.

6 DISCUSSION

We propose the method of truncated orthogonal polynomial expansion in order to obtain the Kolmogorov–Wiener filter weight function on the basis of the Fredholm integral equation of the first kind (1). A set of polynomials orthogonal for $t \in [0, T]$ is built (6), and this set is convenient because of the above-mentioned properties of the integral brackets. The analytical expressions for the approximate solutions for the integral equation (1) are obtained in the one-, two-, three-, four- and five-polynomial approximation.

The kernel of the integral equation (1) is not a positively defined function, so the proposed method is not necessarily convergent for all the parameters. The sets of parameters (27), (29), (30) are chosen to check the convergence and the accuracy of the proposed method. The investigation is numerically made up to the 18-polynomial approximation.

For rather small T ($T = 10$) the method is convergent, and starting from the three-polynomial approximation the left-hand and the right-hand sides of (1) are rather close, starting from the eight-polynomial approximation they are almost ideally identical.

For $T = 100$ a rather strange behavior of n-polynomial approximations is seen. The accuracy increases up to the eight-polynomial approximation, starting from the three-polynomial approximation the left-hand and the right-hand sides of (1) are rather close, for the seven- and eight-polynomial approximation they are almost ideally identical. The corresponding graphs for the one-, two-, three-, four and five-polynomial approximations are given. Then for $9 \le n \le 15$ the method fails, and for $16 \le n \le 18$ the method again works very well. Such behavior can hardly be explained. But it should be stressed that the approximation of 3–8 polynomials works well, and the corresponding obtained

© Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-5

weight functions may be applied to a further investigation of the data forecast.

For $T = 1000$ the method is not convergent, the five-polynomial approximation is not good, and the accuracy decreases with the number n of polynomials for $n \geq 5$. But for $n = 1, 2, 3, 4$ the accuracy of the obtained solutions increases, and three- and four-polynomial approximations are rather accurate.

To summarize the above-mentioned, we should stress that the proposed method is not necessarily convergent for all the parameters. It works well for rather small values of the parameter T, but for high values of this parameter the method may not be convergent. Nevertheless, the approximation of rather small number of polynomials may be rather accurate in a wide range of parameters. But it should be stressed that generally speaking, each of the approximations obtained by the proposed method should be checked numerically before it is applied in further investigation of data forecast.

CONCLUSIONS

Approximate solutions for the Kolmogorov-Wiener filter weight function for fractal processes are obtained and the applicability of the proposed method is discussed.

The scientific novelty of the obtained results is that the approximate solutions for the weight function in the problem under consideration are obtained on the basis of the truncated orthogonal polynomial expansion method. The applicability of the proposed solutions is discussed.

The practical significance is that the obtained results may be applied to further investigation of data forecast for continuous fractal processes.

Prospects for further research are to apply the obtained results to the corresponding investigation of data forecast.

REFERENCES

1. Korniienko V., Matsyuк S., Udovik I., Alekseyev A. Method and algorithms of nonlinear dynamic processes identification, *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2016, No. 1, pp. 98–103.
2. Kornienko V., Gerasina A., Gusev A. Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production, *In book "Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems"*. Taylor & Francis Group, London, 2013, pp. 183–192. ISBN 978-1-138-00126-8.
3. Bagmanov V. Kh., Komissarov A. M., Sultanov A. Kh. Prognozirovanie teletraffika na osnove fraktalnykh filtrov, *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo universiteta*, 2007, Vol. 9, No. 6 (24), pp. 217–222.
4. Pipiras V., Taqqu M. Long-Range Dependence and Self-Similarity. Cambridge University Press, 2017, 668 p. DOI: 10.1017/CBO9781139600347
5. Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I. On the analytical solution of a Volterra integral equation for investigation of fractal processes, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, No. 4, pp. 42–50.
6. Miller S., Childers D. Probability and Random Processes With Applications to Signal Processing and Communications. Second edition. Amsterdam, Elseiver/Academic Press, 2012, 598 p. DOI: doi.org/10.1016/B978-0-12-386981-4.50001-1
7. Gorev V. N., Sokolovsky A. I. Plasma kinetic coefficients with account for relaxation processes, *International Journal of Modern Physics B*., 2015, Vol. 29, No. 32, pp. 1550233 (23 pages).
8. Loyalka S. K., Tipton E. L., Tompson R. V. Chapman–Enskog solutions to arbitrary order in Sonine polynomials I: Simple, rigid-sphere gas, *Physica A.*, 2007, Vol. 379, pp. 417–435.
9. Polyanin A. D., Manzhirov A. V. Handbook of the integral equations. Second edition. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press. Taylor & Francis Group, 2008, 1143 p.
10. Ismail Mourad E. H. Classical and Quantum Orthogonal Polynomials in One Variable. Cambridge University Press, 2005, 708 p.
11. Ziman J. M. Electrons and Phonons. The Theory of Transport Phenomena in Solids. Oxford University Press, 2001, 576 p.

Received 21.02.2019.
Accepted 24.03.2019.

УДК 517.968.21

ПОЛІНОМНІ РОЗВ'ЯЗКИ ДЛЯ ВАГОВОЇ ФУНКЦІЇ ФІЛЬТРА КОЛМОГОРОВА-ВІНЕРА ДЛЯ ФРАКТАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

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

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

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

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Ми розглядаємо фільтр Колмогорова-Вінера для випадкових фрактальних процесів, які, наприклад, можуть мати місце в сучасних інформаційно-телекомунікційних системах та у керуванні складними технологічними процесами. Вагова функція фільтру, що розглядається, може бути застосована до прогнозу даних у відповідних системах.

Мета роботи. Як відомо, у неперервному випадку рівняння на вагову функцію фільтра Колмогорова-Вінера є рівнянням Фредгольма першого роду. Метою роботи є отримати вагову функцію фільтра Колмогорова-Вінера як наближений розв'язок відповідного інтегрального рівняння.

Метод. Використано метод обірваного розвинення за ортогональними поліномами для наближеного розв'язання інтегрального рівняння Фредгольма першого роду. Використано систему ортонормованих поліномів.

Результати. Нами отримано наближені результати для вагової функції фільтру Колмогорова-Вінера для фрактальних процесів з степеневою структурною функцією. Вагову функцію знайдено як наближений розв'язок інтегрального рівняння Фредгольма першого роду, ядром якого є кореляційна функція відповідного випадкового фрактального процесу. Аналітичні результати отримано для наближень одного, двох, трьох, чотирьох та п'яти поліномів. Для різних значень параметрів зроблене чисельне порівняння лівої та правої частин інтегрального рівняння для отриманих вагових функцій. Відповідне

© Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-5

чисельне дослідження зроблене у математичному пакеті Wolfram Mathematica до наближення 18 поліномів включно. Обговорюється застосовність отриманих результатів.

Висновки. Наближено отримано вагову функцію фільтра Колмогорова-Вінера для фрактальних процесів у вигляді обірваного ряду за ортогональними поліномами. Обговорено застосовність отриманих вагових функцій. Отримані результати можуть бути застосовними до прогнозування данних для багатьох різних систем, де мають місце фрактальні процеси.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вагова функція фільтру Колмогорова-Вінера, обірване розвинення за ортогональними поліномами, інтегральне рівняння Фредгольма першого роду, наближений розв'язок.

УДК 517.968.21

ПОЛИНОМНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ВЕСОВОЙ ФУНКЦИИ ФИЛЬТРА КОЛМОГОРОВА-ВИНЕРА ДЛЯ ФРАКТАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Горев В. Н. – канд. физ.-мат. наук, ассистент кафедры безопасности информации и телекоммуникаций, Национальный технический университет Днепровская Политехника, Днепр, Украина.

Гусев А. Ю. – канд. физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры безопасности информации и телекоммуникаций, Национальный технический университет Днепровская Политехника, Днепр, Украина.

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Мы рассматриваем фильтр Колмогорова-Винера для фрактальных процессов, которые, например, могут иметь место в современных информационно-телекоммуникационных системах и в управлении сложными технологическими процессами. Весовая функция рассматриваемого фильтра может быть применена для прогноза данных в соответствующих системах.

Цель работы. Как известно, в непрерывном случае уравнение на весовую функцию фильтра Колмогорова–Винера есть интегральным уравнением Фредгольма первого рода. Цель работы – получить весовую функцию фильтра Колмогорова–Винера как приближенное решение соответствующего интегрального уравнения.

Метод. Использован метод оборванного разложения по ортогональным полиномам для получения приближенного решения интегрального уравнения Фредгольма первого рода. Использовалась система ортонормированных полиномов.

Результаты. Нами получены приближенные результаты для весовой функции фильтра Колмогорова-Винера для фрактальных процессов, структурная функция которых есть степенной функцией. Весовая функция найдена как приближенное решение интегрального уравнения Фредгольма первого рода, ядром которого есть корреляционная функция соответствующего фрактального процесса. Аналитические результаты получены для приближений одного, двух, трех, четырех и пяти полиномов. Для разных значений параметров сделано численное сравнение левой и правой частей интегрального уравнения для полученных весовых функций. Соответствующее численное исследование проводилось с помощью математического пакета Wolfram Mathematica вплоть до приближения 18 полиномов. Обговаривается применимость полученных решений.

Выводы. Весовая функция фильтра Колмогорова-Винера для фрактальных процессов приближенно получена в виде оборванного ряда по ортогональным полиномам. Обсуждается применимость полученных весовых функций. Полученные результаты могут быть применены к прогнозированию данных в широком разнообразии различных систем, в которых имеют место случайные фрактальные процессы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: весовая функция фильтра Колмогорова-Винера, оборванное разложение по ортогональным полиномам, интегральное уравнение Фредгольма первого рода, приближенное решение.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Method and algorithms of nonlinear dynamic processes identification / [V. Korniienko, S. Matsyuk, I. Udovik, A. Alekseyev] // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2016. – No. 1. – P. 98–103.
2. Kornienko V. Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production / V. Kornienko, A. Gerasina, A. Gusev // In book "Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems". – Taylor & Francis Group, London, 2013. – P. 183–192. ISBN 978-1-138-00126-8.
3. Bagmanov V. Kh. Prognozirovanie teletraffika na osnove fraktalnykh filtrov / V. Kh. Bagmanov, A. M. Komissarov, A. Kh. Sultanov // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo universiteta. – 2007. – Vol. 9, No. 6 (24). – P. 217–222.
4. Pipiras V. Long-Range Dependence and Self-Similarity / V. Pipiras, M. Taqqu. – Cambridge University Press, 2017. – 668 p. DOI: 10.1017/CBO9781139600347
5. Gorev V. N. On the analytical solution of a Volterra integral equation for investigation of fractal processes / V. N. Gorev, A. Yu. Gusev, V. I. Korniienko // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – No. 4. – P. 42–50.
6. Miller S. Probability and Random Processes With Applications to Signal Processing and Communications. Second edition / S. Miller, D. Childers. – Amsterdam: Elseiver/Academic Press, 2012. – 598 p. DOI: doi.org/10.1016/B978-0-12-386981-4.50001-1
7. Gorev V. N. Plasma kinetic coefficients with account for relaxation processes / V. N. Gorev, A. I. Sokolovsky // International Journal of Modern Physics B. – 2015. – Vol. 29, No. 32. – P. 1550233 (23 pages).
8. Loyalka S. K. Chapman-Enskog solutions to arbitrary order in Sonine polynomials I: Simple, rigid-sphere gas / S. K. Loyalka, E. L. Tipton, R. V. Tompson // Physica A. – 2007. – Vol. 379. – P. 417–435.
9. Polyanin A. D. Handbook of the integral equations. Second edition / A. D. Polyanin, A. V. Manzhirov. – Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press. – Taylor & Francis Group. – 2008. – 1143 p.
10. Ismail Mourad E. H. Classical and Quantum Orthogonal Polynomials in One Variable / E. H. Ismail Mourad. – Cambridge University Press, 2005. – 708 p.
11. Ziman J. M. Electrons and Phonons. The Theory of Transport Phenomena in Solids / J. M. Ziman. – Oxford University Press, 2001. – 576 p.

© Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-5

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

УДК 519.24

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ПЛАНОВ МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МИНИМАЛЬНЫМ ЧИСЛОМ ПЕРЕХОДОВ УРОВНЕЙ ФАКТОРОВ

Кошевой Н. Д. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Костенко Е. М. – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры технологий и оборудования перерабатывающих и пищевых производств, Полтавская государственная аграрная академия, Полтава, Украина.

Павлик А. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Кошевая И. И. – аспирант кафедры авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Рожнова Т. Г. – канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Решена актуальная задача сокращения множества планов многофакторных экспериментов при поиске оптимального по стоимостным затратам.

Цель работы – синтез и исследование множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов.

Метод. Применение методов планирования эксперимента позволяет сократить стоимостные и временные затраты при исследовании различных технологических процессов, приборов и систем.

Минимизация количества переходов уровней факторов в плане эксперимента, в свою очередь, приводит к уменьшению стоимости (времени) его реализации. Одним из методов уменьшения количества переходов уровней факторов является применение кода Грея при построении плана эксперимента.

Показано, что планы многофакторних экспериментов, построенные с использованием кода Грея, имеют минимальное количество переходов уровней факторов, но не всегда оптимальны по стоимости (времени) реализации эксперимента.

Для синтеза множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов при поиске оптимального плана по стоимостным (временным) затратам предложен метод, в основе которого лежит генерация вариантов двоичных кодов, анализ их характеристик и выбор последовательностей, отвечающих заданным требованиям. Формирование типовых планов эксперимента осуществляется по методу, в основе которого лежит генерация вариантов построения планов, определение классов эквивалентности относительно заданной группы Р преобразований и формирование множества типовых представителей для выделенных классов эквивалентности.

Результаты. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенные методы, которое использовано при построении множества планов экспериментов для количества факторов k=3 с минимальным числом переходов уровней.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенных методов и реализующего их программного обеспечения, которое позволяет сократить множество планов эксперимента для поиска оптимального. Научную новизну работы представляют методы, которые позволяют синтезировать множество планов многофакторных экспериментов, сокращающих поиск оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов. Практическая значимость результатов работы в том, что разработанное программное обеспечение, реализующее предложенные методы, может найти широкое применение при исследовании технологических процессов, приборов и систем, на которых возможна реализация активного эксперимента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: методы, оптимальный план эксперимента, множество, программное обеспечение, стоимость.

НОМЕНКЛАТУРА

k – количество факторов;

X_i – i-й фактор;

$X_{\min n}$ – множество планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов;

$X_{\text{опт пп}}$ – планы, полученные методом полного перебора;

$X_{\text{опт Г}}$ – планы, построенные с использованием кода Грея.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эффективности экспериментальных исследований, направленных на построение математических моделей объектов, целесообразно применять методы планирования эксперимента. При этом изменение порядка проведения опытов плана эксперимента существенно влияет на стоимость (время) реализации эксперимента, так как переход от одного опыта к другому не равнозатратен.

Характерно, что при стремлении к минимальному количеству переходов уровней факторов будем также приближаться к минимизации стоимости (времени) реализации эксперимента. Минимальное количество переходов уровней факторов имеют планы экспериментов, построенные с применением кода Грея [1]. Однако существует множество планов с минимальным числом переходов уровней факторов, которое необходимо исследовать по критерию стоимости (времени) их реализации.

Объект исследования: процессы оптимизации по стоимостным затратам планов многофакторных экспериментов.

© Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Павлик А. В., Кошевая И. И., Рожнова Т. Г., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-6

Предмет исследования: множества планов многофакторных экспериментов с минимальным числом переходов уровней факторов.

Цель исследования: синтез и исследование множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– показать, что планы многофакторных экспериментов $X_{\text{опт Г}}$, построенные с использованием кода Грея, имеют минимальное количество переходов уровней факторов, но не всегда оптимальны по стоимостным (временным) затратам на их реализацию;

– разработать программное обеспечение для синтеза множества планов эксперимента $X_{\min n}$ с минимальным числом переходов уровней факторов;

– для количества факторов k =3 с помощью разработанного программного обеспечения синтезировать и исследовать планы эксперимента $X_{\min n}$ с минимальным числом переходов уровней факторов;

– показать, что оптимальные планы, полученные методом полного перебора $X_{\text{опт пп}}$ и с применением кода Грея $X_{\text{опт Г}}$ входят в множество планов $X_{\min n}$, т.е. $X_{\text{опт пп}} \in X_{\min n}$; $X_{\text{опт Г}} \in X_{\min n}$.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для построения оптимальных планов экспериментов можно применять методы комбинаторной оптимизации [2–18]. Эти методы имеют свои преимущества и недостатки. Существенными недостатками при их применении являются: низкое быстродействие, не всегда находится точное решение, а удается найти решение лишь близкое к оптимальному.

Известны примеры [1] построения методами, основанными на использовании кода Грея, оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов многофакторных экспериментов.

Однако планы, синтезированные этими методами, имеют минимальное количество переходов уровней факторов, но не всегда оптимальны по стоимости (времени) реализации эксперимента.

Оптимизацию планов эксперимента по стоимостным (временным) затратам методом полного перебора при современном уровне развития вычислительной техники можно решить только для количества факторов $k \le 3$.

Следовательно возникает проблема сокращения множества планов многофакторного эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов для поиска оптимальных по стоимостным (временным) затратам на его реализацию.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе [6] для исследования следящей системы приведены исходный план полного факторного эксперимента (табл. 1) и стоимости изменения значений уровней факторов (табл. 2).

Таблица 1 – Исходный и оптимальный планы эксперимента

Исходный план				Полученный методом полного перебора		
Номер опыта	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
1	–1	–1	–1	+1	+1	–1
2	+1	–1	–1	+1	+1	+1
3	–1	+1	–1	+1	–1	+1
4	+1	+1	–1	+1	–1	–1
5	–1	–1	+1	–1	–1	–1
6	+1	–1	+1	–1	–1	+1
7	–1	+1	+1	–1	+1	+1
8	+1	+1	+1	–1	+1	–1

Таблица 2 – Стоимости изменения значений уровней факторов

Стоимости изменений значений уровней факторов	Обозначения факторов		
	X_1	X_2	X_3
из «–1» в «+1», усл. ед.	8,0	2,0	1,0
из «+1» в «–1», усл. ед.	4,0	2,4	1,6

Оптимизация исходного плана эксперимента по стоимостным затратам на его реализацию осуществлялась методом полного перебора. При этом стоимость реализации эксперимента по оптимальному плану (см. табл. 1) составляет 13,6 усл. ед.

В данной статье оптимизация плана полного факторного эксперимента для исследования следящей системы осуществлялась методом, основанным на применении кода Грея [1].

Для синтеза множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов при поиске оптимального по стоимости (времени) реализации плана предложен метод, в основе которого лежит генерация вариантов двоичных кодов, анализ их характеристик и выбор последовательностей, отвечающих заданным требованиям. Формирование типовых планов эксперимента осуществляется по методу, в основе которого лежит генерация вариантов построения планов, определения классов эквивалентности относительно заданной группы Р преобразований и формирование множества типовых представителей для выделенных классов эквивалентности.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

При оптимизации плана полного факторного эксперимента методом, основанным на применении кода Грея, получен вариант, приведенный в табл. 3.

Стоимость реализации этого плана составляет 17,6 усл. ед. Таким образом, план, полученный методом, основанным на применении кода Грея, оптимальный по числу переходов уровней факторов, но не оптимальный по стоимости реализации эксперимента.

Следовательно, возникает задача синтеза множества планов эксперимента с минимальным числом переходом уровней факторов для поиска оптимального плана по стоимостным (временным) затратам.

© Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Павлик А. В., Кошевая И. И., Рожнова Т. Г., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-6

Таблица 3 – План эксперимента, полученный методом на основе кода Грея

Номер опыта	X_1	X_2	X_3
1	–1	–1	–1
2	–1	–1	+1
3	–1	+1	+1
4	–1	+1	–1
5	+1	+1	–1
6	+1	+1	+1
7	+1	–1	+1
8	+1	–1	–1

Для решения этой задачи авторами разработана компьютерная программа формирования вариантов кодов с минимальными изменениями [19], в основе которой лежит генерация вариантов двоичных кодов, анализ их характеристик и выбор последовательностей, которые отвечают заданным требованиям.

В программе возможно задание минимального и максимального количества изменений.

Авторами также разработана компьютерная программа формирования типовых планов многофакторного эксперимента [20], в основе работы которой лежит генерация вариантов построения планов, определение классов эквивалентности относительно заданной группы P преобразований и формирование множества типовых представителей для выделенных классов эквивалентности.

Разработанное программное обеспечение реализовано на языке «TURBO PASCAL», построено по модульному принципу и обеспечивает гибкую адаптацию для решения более широкого класса задач.

Работа с ЭВМ осуществляется в режиме диалога. Просчеты выполнялись на компьютере с процессором Intel Pentium G20 с частотой 2,60 ГГц.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью программы [19] для $k = 3$, где k – количество факторов, были построены 144 плана эксперимента (двоичные коды) с минимальным количеством изменений $(2^k–1)$. Фрагмент этого множества представлен в табл. 4 и включает также план (N_{om} = 137), построенный методом на основе кода Грея и план (N_{om} = 57) полного перебора.

Таблица 4 – Двоичные коды с минимальным количеством изменений $(2^k–1)$ для $k = 3$

57	**58**	**59**	**60**	**61**	**62**	**63**	**64**	**65**	**66**	**67**
+1 +1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	–1 –1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1
+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 –1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	–1 +1 –1	–1 +1 –1	–1 +1 –1
+1 –1 +1	+1 –1 +1	+1 +1 +1	+1 –1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 –1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 –1 –1
+1 –1 –1	+1 –1 –1	+1 –1 +1	–1 –1 +1	–1 –1 +1	–1 +1 –1	–1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	–1 –1 +1
–1 –1 –1	–1 –1 –1	+1 –1 –1	–1 +1 +1	+1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 –1 +1	–1 +1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 +1	–1 +1 +1
–1 –1 +1	–1 +1 –1	–1 –1 –1	–1 +1 –1	+1 –1 –1	–1 –1 +1	+1 –1 +1	–1 –1 +1	+1 –1 –1	–1 –1 +1	+1 +1 +1
–1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 –1 –1	+1 –1 +1	+1 –1 –1	+1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 –1 –1	+1 –1 +1
–1 +1 –1	–1 –1 +1	–1 +1 +1	+1 –1 –1	–1 +1 –1	+1 –1 –1	–1 –1 –1	+1 –1 –1	–1 –1 +1	+1 –1 –1	+1 –1 –1
68	**69**	**70**	**71**	**72**	**73**	**74**	**75**	**76**	**77**	**78**
–1 –1 –1	–1 –1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1
–1 –1 +1	–1 +1 +1	–1 –1 +1	–1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 +1 +1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1
–1 +1 +1	–1 +1 –1	–1 –1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 –1 –1	+1 –1 –1	–1 +1 –1	+1 –1 –1
–1 +1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	–1 +1 –1	–1 +1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 –1 –1
+1 +1 –1	+1 +1 +1	+1 +1 –1	+1 –1 +1	+1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 –1 +1	–1 –1 +1	–1 –1 +1	+1 –1 –1	–1 +1 –1
+1 +1 +1	+1 –1 +1	+1 +1 +1	–1 –1 +1	+1 –1 –1	–1 –1 +1	+1 –1 +1	–1 +1 +1	–1 –1 –1	+1 –1 +1	–1 +1 +1
+1 –1 +1	+1 –1 –1	+1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 –1 –1	+1 –1 +1	+1 –1 –1	–1 +1 –1	–1 +1 –1	–1 –1 +1	–1 –1 +1
+1 –1 –1	–1 –1 –1	+1 –1 –1	+1 –1 –1	–1 –1 +1	+1 –1 –1	–1 –1 –1	–1 –1 –1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	+1 –1 +1
79	**80**	**81**	**82**	**83**	**84**	**120**	**121**	**122**	**123**	**124**
+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 –1 +1	–1 –1 –1	+1 –1 +1	–1 –1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 +1
+1 +1 –1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	+1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 –1 +1	+1 +1 +1	+1 –1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1
–1 +1 –1	–1 –1 +1	–1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 +1	+1 –1 +1	+1 +1 –1	+1 +1 +1	+1 +1 –1	+1 +1 –1
–1 +1 +1	–1 –1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 –1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 +1	–1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 –1 –1	+1 –1 –1
–1 –1 +1	–1 +1 –1	+1 –1 –1	+1 –1 –1	+1 –1 +1	–1 +1 –1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	+1 –1 –1	–1 –1 –1	–1 –1 –1
–1 –1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 –1 +1	–1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 +1 –1	–1 +1 –1	–1 +1 –1
+1 –1 –1	+1 –1 –1	–1 –1 +1	–1 –1 +1	–1 –1 –1	+1 –1 –1	+1 +1 –1	+1 –1 –1	–1 +1 –1	–1 +1 +1	–1 +1 +1
+1 –1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 +1 –1	+1 –1 +1	+1 –1 –1	+1 –1 –1	–1 +1 +1	–1 –1 +1	–1 +1 –1
125	**126**	**127**	**128**	**129**	**130**	**131**	**132**	**133**	**134**	**135**
+1 –1 +1	–1 –1 +1	–1 –1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 –1	–1 –1 –1	+1 –1 –1	+1 –1 –1	–1 –1 +1	–1 –1 +1	+1 –1 –1
+1 +1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 –1	+1 –1 +1	+1 –1 –1	+1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 –1 –1	–1 –1 –1	–1 –1 –1
–1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 –1 –1	–1 –1 –1	+1 +1 +1	+1 –1 +1	+1 +1 +1	–1 –1 +1	+1 –1 –1	+1 –1 –1	–1 –1 +1
–1 –1 +1	–1 +1 +1	–1 –1 –1	–1 –1 +1	+1 +1 –1	+1 +1 +1	+1 +1 –1	+1 –1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 +1
–1 –1 –1	–1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 +1	+1 +1 +1
+1 –1 –1	–1 –1 –1	–1 +1 +1	+1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 –1	–1 –1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 +1
+1 +1 –1	+1 –1 –1	+1 +1 +1	+1 +1 –1	–1 –1 +1	–1 +1 +1	–1 –1 +1	–1 +1 –1	–1 +1 –1	–1 +1 –1	–1 +1 –1
–1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	–1 –1 –1	–1 –1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	+1 +1 –1	+1 +1 –1
136	**137**	**138**	**139**	**140**	**141**	**142**	**143**	**144**		
+1 –1 –1	–1 –1 –1	+1 –1 –1	+1 –1 –1	–1 +1 –1	+1 –1 –1	–1 +1 +1	–1 –1 +1	–1 +1 –1		
+1 –1 +1	+1 –1 –1	+1 –1 +1	+1 –1 +1	–1 –1 –1	–1 –1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	–1 +1 +1		
+1 +1 +1	+1 –1 +1	–1 –1 +1	–1 –1 +1	+1 –1 –1	–1 +1 –1	–1 –1 –1	–1 +1 –1	–1 –1 +1		
–1 +1 +1	–1 –1 +1	–1 +1 +1	–1 –1 –1	+1 –1 +1	–1 +1 +1	+1 –1 –1	–1 –1 –1	–1 –1 –1		
–1 –1 +1	–1 +1 +1	+1 +1 +1	–1 +1 –1	–1 –1 +1	–1 –1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 –1	+1 –1 –1		
–1 –1 –1	+1 +1 +1	+1 +1 –1	–1 +1 +1	–1 +1 +1	+1 –1 +1	+1 +1 +1	+1 –1 +1	+1 –1 +1		
–1 +1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 +1	+1 +1 –1	+1 +1 +1	+1 +1 +1		
+1 +1 –1	–1 +1 –1	–1 –1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1	–1 +1 –1	+1 +1 –1	+1 +1 –1		

© Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Павлик А. В., Кошевая И. И., Рожнова Т. Г., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-6

При использовании метода полного перебора для этого случая анализируется 40320 вариантов.

Программа [19] для $k = 3$ позволила построить базу данных типовых кодов с минимальными изменениями (табл. 5), в которую также вошли планы эксперимента, полученные методами на основе кода Грея (№3) и полного перебора (№ 20).

6 ОБСУЖДЕНИЕ

При синтезе планов для исследования следящей системы показано, что планы многофакторного эксперимента, построенные с использованием кода Грея, имеют минимальное количество переходов уровней факторов, но не всегда оптимальны по стоимости реализации эксперимента.

Таблица 5 – Множество типовых представителей планов с минимальными изменениями

№	Номер опыта								№	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8
1	–1	+1	+1	–1	–1	–1	+1	+1	2	–1	+1	+1	–1	–1	–1	+1	+1
	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1		–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1
	–1	–1	+1	+1	+1	–1	–1	+1		+1	+1	–1	–1	–1	+1	+1	–1
3	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1	4	–1	+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1
	–1	–1	+1	+1	+1	+1	–1	–1		–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1	–1
	–1	+1	+1	–1	–1	+1	+1	–1		+1	+1	–1	–1	+1	+1	–1	–1
5	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1	6	–1	–1	+1	+1	+1	–1	–1	+1
	+1	+1	–1	–1	–1	+1	+1	–1		+1	–1	–1	+1	+1	+1	–1	–1
	+1	–1	–1	+1	+1	+1	–1	–1		+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1
7	–1	–1	+1	+1	+1	+1	–1	–1	8	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1	–1
	+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1		+1	+1	–1	–1	+1	+1	–1	–1
	+1	–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1		+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1
9	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1	10	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1	–1
	–1	+1	+1	–1	–1	+1	+1	–1		+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1
	+1	+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1		–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1	+1
11	+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	12	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1
	–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1	+1		+1	–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1
	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1	+1		+1	+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1
13	–1	+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	14	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1
	–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1	+1		–1	–1	+1	+1	+1	+1	–1	–1
	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1	+1		+1	–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1
15	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1	16	–1	+1	+1	–1	–1	–1	+1	+1
	–1	–1	+1	+1	+1	–1	–1	+1		–1	–1	+1	+1	+1	–1	–1	+1
	+1	–1	–1	+1	+1	+1	–1	–1		+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1
17	–1	–1	+1	+1	+1	+1	–1	–1	18	–1	+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1
	–1	+1	+1	–1	–1	+1	+1	–1		–1	–1	–1	+1	+1	+1	+1	–1
	+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1		–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1	+1
19	–1	+1	+1	–1	–1	–1	+1	+1	20	–1	+1	+1	–1	–1	+1	+1	–1
	+1	+1	–1	–1	–1	+1	+1	–1		+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1
	+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1		+1	+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1
21	–1	+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	22	+1	+1	–1	–1	–1	+1	+1	–1
	+1	+1	–1	–1	+1	+1	–1	–1		+1	–1	–1	+1	+1	+1	–1	–1
	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1	+1		+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1
23	+1	+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1	24	+1	+1	–1	–1	+1	+1	–1	–1
	+1	–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1		+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1	+1
	+1	+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1		+1	+1	+1	–1	–1	–1	–1	+1

© Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Павлик А. В., Кошевая И. И., Рожнова Т. Г., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-6

В результате анализа множеств планов эксперимента (см. табл. 4 и 5), полученных с помощью разработанного программного обеспечения, видно, что существенно сокращается множество планов эксперимента для поиска оптимального по стоимостным (временным) затратам, поскольку полученная база данных (см. табл. 5) включает всего 24 плана, а при использовании метода полного перебора анализируется 40320 вариантов.

ВЫВОДЫ

1. В работе решена актуальная проблема по сокращению множества планов эксперимента для поиска оптимального по стоимостным (временным) затратам.

2. Показано, что методы синтеза планов многофакторных экспериментов, основанные на применении кода Грея, не всегда дают оптимальный по стоимости (времени) реализации план.

3. Разработаны компьютерные программы, которые формируют базы данных и значительно сокращают множество планов эксперимента для поиска оптимального по стоимостным (временным) затратам на его реализацию. Для $k = 3$ множество включает 24 плана эксперимента вместо 40320 вариантов при полном переборе.

4. **Научная новизна** работы:

– впервые предложен метод синтеза множества планов эксперимента с минимальным числом переходов уровней факторов, в основе которого лежит генерация вариантов двоичных кодов, анализ их характеристик и выбор последовательностей, отвечающих заданным требованиям, позволяющий сократить множество для поиска оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов эксперимента;

– впервые предложен метод формирования типовых планов эксперимента, в основе которого лежит генерация вариантов построения планов, определения классов эквивалентности относительно заданной группы P преобразований и формирование множества типовых представителей для выделенных классов эквивалентности, позволяющий значительно сократить множество для поиска оптимальных по стоимостным (временным) затратам планов эксперимента.

5. **Практическая** значимость результатов работы в том, что разработанное программное обеспечение, реализующее предложенные методы, может найти широкое применение при исследовании технологических процессов, приборов и систем, на которых возможна реализация активного эксперимента, например, аппаратно-программный комплекс экспериментальной отработки процессов [21].

6. **Перспективы дальнейших исследований** состоят в применении разработанного программного обеспечения для исследования трехуровневых планов и композиционных планов второго порядка.

ЛИТЕРАТУРА/ЛІТЕРАТУРА

1. Кошевой Н. Д. Применение методов оптимизации, основанных на коде Грея, при исследовании технологических процессов и приборов / Н. Д. Кошевой, И. И. Кошевая, Е. М. Костенко // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2018. – № 3, Том 2. –С. 241–245.
2. Hoskins D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing / D. S. Hoskins // Applied Optimal Designs. – 2007. – № 4. – P. 147–179.
3. Morgan J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics / J. P. Morgan // Journal of the American Statistical Association. – 2005. – Vol. 100. – № 471. – P. 1092–1093.
4. Bailey R. A. Combinatorics of optimal designs / R. A. Bailey, P. G. Cameron // Surveys in Combinatorics. – 2009. – V.365. – P. 19–73.
5. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие / А. П. Карпенко. – М. : изд-во МГТУ им. Н.Э Баумана, 2014. – 446 с.
6. Кошевой Н. Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко. – Полтава : издатель Шевченко Р. В., 2013. – 317 с.
7. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments / D. C. Montgomery. – 9th ed. – Wiley, 2017. – 629 p.
8. Bartos B. J. Design and analysis of time series experiments / B. J. Bartos, R. Mc Cleary, D. Mc Dowall. – Oxford : Oxford University Press, 2017. – 393 p.
9. Berger P. D. Experimental Design with Applications in Management, Engineering and the Sciences / P. D. Berger, R. E. Maurer. – Celli New York : Springer, 2018. – 640 p.
10. Rodrigues M. I. Experimental Design and Process Optimization / M. I. Rodrigues, A. F. Iemma. – N.-Y. : CRC Press, 2016. – 336 p.
11. Wu C. F. J. Experiments: Planning, Analysis, and Optimization / C. F. J. Wu., M. S. Hamada. – Wiley, 2015. – 743 p.
12. Кошевой Н. Д. Применение алгоритма оптимизации роем частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента / Н. Д. Кошевой, А. А. Беляева // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2018. – № 1. – С. 41–49. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-5.
13. Кошевой Н. Д. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора / Н. Д. Кошевой, А. А. Беляева // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2018. – № 4. – С. 179–187. DOI: 10. 15588/1607-3274-2018-4-17.
14. Гальченко В. Я. Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тучков // Visnyk NTUU KPI: Seriia Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia. – 2018. – Issue 74. – P. 60–72. DOI: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72.
15. Yakovlev S. Convex extensions in combinatorial optimization and their applications / S. Yakovlev // Springer Optimization and its Applications. – Springer, New York, 2017. – Vol. 130. – P. 567–584.
16. Yakovlev S. V. Properties of combinatorial optimization problems over polyhedral-spherical sets / S. V. Yakovlev, O. S Pichugina // Cybernetics and Systems Analysis. – 2018. – No. 1, Vol. 54. – P. 99–109.
17. Ugryumov M. L. Network-characteristic calculation method of spatial boundary layer on bounding surface of interblade channel of turboset / M. L. Ugryumov, V. A. Men'shikov, V .V. Belik // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Aviatsionnaya Tekhnika. – 1992. – №1. – P. 38–41.
18. Stochastic optimization models and method in the turbomachines system improvement problem / [M. L. Ugryumov, V. E. Afanasjevska, A. A. Tronchuk, A. V. Myenyaylov] // ASME-

© Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Павлик А. В., Кошевая И. И., Рожнова Т. Г., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-6

JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, AJK. – 2011. – № 1 (PARTS A, B, C, D). – P. 755–761.
19. Комп'ютерна програма «Програма формування варіантів кодів з мінімальними змінами» / [М. Д. Кошовий, І. І. Кошова, В. А. Дергачов и др.]: свід. про реєстр. автор. права на твір №74877. – Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 21.11.2017 р.
20. Комп'ютерна програма «Програма формування типових планів багатофакторного експерименту» / [М. Д. Кошовий, І. І. Кошова, В. А. Дергачов и др.]: свід. про реєстр. автор. права на твір №74881. – Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 21.11.2017р.
21. Фирсов С. Н. Аппаратно-программный комплекс экспериментальной отработки процессов управления, диагностирования и парирования отказов малых космических аппаратов / С. Н. Фирсов, О. В. Резникова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 6. – С. 60–69. eLIBRARY ID: 22776434.

Статья поступила в редакцию 25.01.2019.
После доработки 07.03.2019.

УДК 519.24

ДОСЛІДЖЕННЯ МНОЖИНИ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ З МІНІМАЛЬНИМ ЧИСЛОМ ПЕРЕХОДІВ РІВНІВ ФАКТОРІВ

Кошовий М. Д. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри авіаційних приладів і вимірювань, Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Костенко О. М. – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри технологій та обладнання переробних та харчових виробництв, Полтавська державна аграрна академія, Полтава, Україна.

Павлик Г. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри авіаційних приладів і вимірювань, Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Кошова І. І. – аспірант кафедри авіаційних приладів і вимірювань, Національний аерокосмічний університет ім. М.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Рожнова Т. Г. – канд. техн. наук, ст. викладач кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вирішено актуальну задачу скорочення множини планів багатофакторних експериментів для пошуку оптимального за вартісними витратами.

Мета роботи – синтез та дослідження множини планів експерименту з мінімальним числом переходів рівнів факторів.

Методи. Застосування методів планування експерименту дозволяє зменшити вартісні та часові витрати при дослідженні різних технологічних процесів, приладів і систем.

Мінімізація кількості переходів рівнів факторів у плані експерименту, в свою чергу, призводить до зменшення вартості (часу) його реалізації. Одним із методів зменшення кількості переходів рівнів факторів є застосування коду Грея для побудови плану експерименту.

Підтверджується, що плани багатофакторних експериментів, побудовані з використанням коду Грея, мають мінімальну кількість переходів рівнів факторів, але не завжди оптимальні за вартістю (часом) реалізації експерименту.

Для синтезу множини планів експерименту з мінімальним числом переходів рівнів факторів для пошуку оптимального плану за вартісними (часовими) витратами запропоновано метод, в основі якого лежить генерація варіантів двійкових кодів, аналіз їх характеристик та вибір послідовностей, що відповідають заданим вимогам. Формування типових планів експерименту виконується по методу, в основі якого лежить генерація варіантів побудови планів, визначення класів еквівалентності відносно заданої групи Р перетворень та формування множини типових представників для виділених класів еквівалентності.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновані методи, яке використовується для побудови множини планів експериментів для кількості факторів k=3 з мінімальним числом переходів рівнів.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованих методів та реалізуючого їх програмного забезпечення, які дозволяють скоротити множину планів експерименту для пошуку оптимального. Наукову новизну роботи становлять методи, які дозволяють синтезувати множину планів багатофакторних експериментів, що скорочують пошук оптимальних за вартісними (часовими) витратами планів. Практична значимість результатів роботи в тому, що розроблене програмне забезпечення, яке реалізує запропоновані методи, може знайти широке застосування для дослідження технологічних процесів, приладів та систем, на яких можлива реалізація активного експерименту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: методи, оптимальний план експерименту, множина, програмне забезпечення, вартість.

UDC 519.24

RESEARCH OF MULTIPLE PLANS IN MULTI-FACTOR EXPERIMENTS WITH A MINIMUM NUMBER OF TRANSITIONS OF LEVELS OF FACTORS

Koshevoy N. D. – Dr. Sc., Professor, Head of Department, Department of aircraft instrumentation and measurements, National Aerospace University named after M. E. Zhukovskoho "HAI", Kharkov, Ukraine.

Kostenko E. M. – Dr. Sc., Associate Professor, Department of Technology and Equipment for Processing and Food Production, Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine.

Pavlyk A. V. – Dr. Sc., Assistant of Professor, Department of Aircraft Instrumentation and measurements, National Aerospace University named after M. E. Zhukovskoho "HAI", Kharkov, Ukraine.

Koshevaya I. I. – Postgraduate student Department of aircraft instrumentation and measurements, National Aerospace University named after M. E. Zhukovskoho "HAI", Kharkov, Ukraine.

Rozhnova T. G. – PhD, Assistant of Professor, Design Automation Department, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine.

© Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Павлик А. В., Кошевая И. И., Рожнова Т. Г., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-6

ABSTRACT

Contex. The actual problem of reducing the set of plans for multivariate experiments in searching for the best in price costs has been solved.

Objective is the synthesis and study of a variety of experimental plans with a minimum number of transitions of factor levels.

Methods. The use of experimental design methods allows reducing the price and time costs in the study of various technological processes, devices and systems.

Minimizing the number of transitions of levels of factors in terms of the experiment, in turn, leads to a decrease in the cost (time) of its implementation. One of the methods for reducing the number of transitions of levels of factors is the use of the Gray code when constructing a plan of an experiment.

It is shown that multi-factor experiments plans constructed using the Gray code have a minimum number of transitions of factor levels, but are not always optimal in terms of the cost (time) of the experiment.

For the synthesis of many experimental plans with a minimum number of transitions of levels of factors in searching for the optimal plan for cost (time) costs, a method based on the generation of binary code variants is proposed. Analysis of their characteristics and the choice of sequences that meet specified requirements were conducted. The formation of test plans for an experiment is carried out according to the method based on the generation of variants for constructing plans, determining equivalence classes with respect to a given group P of transformations and forming a set of typical representatives for the selected equivalence classes.

Results. Software that implements the proposed methods, which is used in the construction of a set of experimental plans for the number of factors $K = 3$ with the minimum number of level transitions was developed.

Conclusions. The experiments, which were carried out, confirmed the efficiency of the proposed methods and the software implementing them makes it possible to reduce the set of experiment plans for finding the optimal one. The scientific originality of the research is presented by the methods which allow to synthesize many plans of multifactor experiments to reduce the search for optimal plans in price (time) cost. The practical significance of the research results is in the developed software which implements the proposed methods. It can be widely used in the study of technological processes, devices and systems, on which the implementation of an active experiment is possible.

KEYWORDS: methods, optimal experiment plan, set, software, cost.

REFERENSES

1. Koshevoj N. D., Koshevaja I. I., Kostenko E. M. Primenenie metodov optimizacii, osnovannyh na kode Greja, pri issledovanii tehnologicheskih processov i priborov, *Visnik Hersons'kogo nacional'nogo tehnichnogo universitetu,* 2018, No. 3, Tom 2, pp. 241–245.
2. Hoskins D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing. Applied Optimal Designs, vol.4, 2007, pp.147-179.
3. Morgan J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics. *Journal of the American Statistical Association*, 2005, Vol. 100, No. 471, pp. 1092–1093.
4. Bailey R. A., Cameron P. G. Combinatorics of optimal designs. Surveys in Combinatorics, Vol. 365, 2009, pp. 19–73.
5. Karpenko A. P. Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizacii. Algoritmy, vdohnovlennye prirodoj: uchebnoe posobie. Moscow, izd-vo MGTU im. N. Je Baumana, 2014, 446 p.
6. Koshevoj N. D., Kostenko E. M. Optimal'noe po stoimostnym i vremennym zatratam planirovanie jeksperimenta. Poltava, izdatel' Shevchenko R. V., 2013, 317 p.
7. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments, 9th ed. Wiley, 2017, 629 p.
8. Bartos B. J. Cleary R. Mc., Dowall D. Mc. Design and analysis of time series experiments. Oxford, Oxford University Press, 2017, 393 p.
9. Berger P. D., Maurer R. E. Experimental Design with Applications in Management, Engineering and the Sciences. Celli New York, Springer, 2018, 640 p.
10. Rodrigues M. I., Iemma A. F. Experimental Design and Process Optimization. N.-Y., CRC Press, 2016, 336 p.
11. Wu C. F. J., Hamada M. S. Experiments: Planning, Analysis, and Optimization. Wiley, 2015, 743 p.
12. Koshevoj N. D., Beljaeva A. A. Primenenie algoritma optimizacii roem chastic dlja minimizacii stoimosti provedenija mnogofaktornogo jeksperimenta, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, No. 1, pp. 41–49. DOI 10.15588/1607-3274-2018-1-5.
13. Koshevoj N. D., Beljaeva A. A. Sravnitel'nyj analiz metodov optimizacii pri issledovanii vesoizmeritel'noj sistemy i termoreguljatora, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, №4, pp. 179–187. DOI: 10. 15588/1607-3274-2018-4-17. DOI:
14. Gal'chenko V. Ja., Trembovec'ka R. V., Tuchkov V. V. Zastosuvannja nejrokomp'jutinga na etapi pobudovi metamodelej v procesi optimal'nogo surogatnogo sintezu anten, *Visnyk NTUU KPI: Seriia Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia,* 2018, Issue 74, pp. 60–72. DOI: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72.
15. Yakovlev S. Convex extensions in combinatorial optimization and their applications, *Springer Optimization and its Applications*. New York, Springer, 2017, Vol. 130, pp. 567–584.
16. Yakovlev S. V., Pichugina O. S. Properties of combinatorial optimization problems over polyhedral-spherical sets, *Cybernetics and Systems Analysis,* 2018, No. 1, Vol. 54, pp. 99–109.
17. Ugryumov M. L., Men'shikov V. A., Belik V. V. Network-characteristic calculation method of spatial boundary layer on bounding surface of interblade channel of turboset, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Aviatsionnaya Tekhnika,* 1992, No. 1, pp. 38–41.
18. Ugryumov M. L.. Afanasjevska V. E., Tronchuk A. A. , Myenyaylov A. V. Stochastic optimization models and method in the turbomachines system improvement problem, *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, AJK*, 2011, No. 1 (PARTS A, B, C, D), pp. 755–761.
19. Koshovy`j M. D., Koshova I. I., Dergachov V. A., Pavlyk G. V., Kostenko O. M. Komp'yuterna programa "Programa formuvannya variantiv kodiv z minimal`ny`my` zminamy`", svid. pro reyestr. avtor. prava na tvir №74877, Zareyestr. v Ministerstvi ekonomichnogo rozvy`tku i torgivli Ukrayiny` 21.11.2017r.
20. Koshovy`j M. D., Koshova I. I., Dergachov V. A., Pavly`k G. V. , Kostenko O. M. Komp'yuterna programa «Programa formuvannya ty`povy`x planiv bagatofaktornogo ekspery`mentu», svid. pro reyestr. avtor. prava na tvir №74881. Zareyestr v Ministerstvi ekonomichnogo rozvy`tku i torgivli Ukrayiny` 21.11.2017r.
21. Firsov S. N., Reznikova O. V. Apparatno-programmnyj kompleks jeksperimental'noj otrabotki processov upravlenija, diagnostirovanija i parirovanija otkazov malyh kosmicheskih apparatov, *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2014, No. 6, pp. 60–69. eLIBRARY ID: 22776434.

© Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Павлик А. В., Кошевая И. И., Рожнова Т. Г., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-6

UDC 004.9

IMPROVING THE QUALITY OF CREDIT ACTIVITY BY USING SCORING MODEL

Melnyk K. V. – PhD, Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

Borysova N. V. – PhD, Associate professor of the Department of Intelligent Computer Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of credit assessment of a client is considered. It is a simultaneous processing of lender's data of different nature with further definition of the credit rating. The object of this study was the process of lending to individuals by credit institutions.

Objective. The purpose of the work is to study the process of improving the quality of lending through the development and use of a scorecard model.

Method. An analytical review of the domain area was conducted. A business process model for assessing clients' creditworthiness in the form of an IDEF0 diagram is developed. Dedicated groups of indicators characterizing a potential lender from different directions. Selected sets of values for each indicator of credit separately. The methods of solving the problem of clients' creditworthiness are analyzed. Selected Bayesian naive classifier as a method for solving the problem of classification of potential lenders. The existing information systems for assessing the creditworthiness of clients are analyzed. A scoring model for assessing credit ratings by the client in the form of an algorithm is developed. The list of functional requirements of the information system, which is presented in the form of a use case diagram is determined. Three-level architecture for the information system is proposed. A database model has been developed to preserve customer information. An information system was developed for determining the credit rating of a client based on the developed scoring model. Numerous studies have been conducted to determine the class of a potential creditor. The process of determining the quality of credit activity is analyzed. Quality indicators for assessing the creditworthiness of clients are selected. The method of calculating the quality of credit activity is offered.

Results. The scoring model was developed, which was used in solving the credit assessment of clients through the help of the proposed information system. The process of improving the quality of credit rating is investigated.

Conclusions. The conducted experiments have confirmed the proposed scoring model and allow recommending it for use in practice for assessment process of client creditworthiness. Scientific novelty is to improve the process of credit activity by automating the use of naïve Bayes classifier, which reduces the human factor in decision-making.

KEYWORDS: scoring model, classification task, naive Bayesian classifier, credit score assessment, lending, lender, borrower, and creditworthiness.

ABBREVIATIONS

NBC – Naive Bayes classifier;
IS – information system;
IT – information technologies.

NOMENCLATURE

K – set of clients;
Q – set of output classes;
q_l – l-th output class, element of the set Q;
q_{lk} – l-th output class of the k-th client, $k \in K$;
K_l – set of clients from l-th output class;
I – set of client's characteristics;
$J_i, i \in I$ – set of i-th characteristic meaning;
f_{ij} – j-th value of i-th characteristics, $j \in J_i, i \in I$;
f_{ij}^k – j-th value of i-th characteristics from k-th client, $j \in J_i, i \in I, k \in K$;
x_{ij}^l – number of j-th value of i-th characteristics l-th output class;
y_l – number of l-th output class from set of clients K_l;
$P(f_{ij}/q_l)$ – conditional probability of occurrence j-th value of i-th characteristic f_{ij} from output class q_l;
$P(q_l)$ – probability of assignment to a client output class q_l;
$P(q_l/\{f_{ij}^{k+1}\})$ – conditional probability of assignment to a client l-th output class based on conditionals $\{f_{ij}^{k+1}\}$;
$R(q_l)$ – probability of assignment to a $k+1$-th client output class q_l;
P – precision of NBC;
R – recall of NBC;
a – the number of clients of a particular class that has been allocated IS and which are really related to this class;
b – the number of clients who were mistakenly attributed to a particular group;
c – the number of customers who mistakenly was not in a certain class.

INTRODUCTION

Lending is the main activity of credit institutions, banks and credit unions. It provides almost 50% of the

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

profitability of these institutions [1]. The basic concepts in the process of lending are a loan, a creditor and a borrower. The credit is the relationship between two subjects of credit relations the creditor and the borrower, in which the creditor transfers the borrower's money, and the borrower undertakes to return the same amount of money within a certain period [2, 3].

In the process of conducting credit operations, the institution works with a credit risk. It is the risk of non-payment by the borrower of the amount of principal and interests. Non-repayment of loans, especially large ones, can lead to a bankruptcy of a credit institution, and this may be the cause of bankruptcy of other enterprises, banks and individuals associated with this bank or credit union.

Therefore, credit risk management is an indispensable part of the strategy and tactics of survival and development of any bank or credit institution. Risk reduction in the implementation of loan operations can be achieved on the basis of a comprehensive examination of the creditworthiness of the bank's clients. Credibility of a client is the ability of a person to complete and to pay off in time for his debt obligations [3, 4].

This topic is of great interest for the research of not only Ukrainian but also foreign economists [2–8]. The scientific literature focuses on lending to enterprises and legal entities. In this case, there are many financial indicators of the company's work, which allow to assess the degree of credit risk.

However, there is no effective method for determining the individual's creditworthiness, therefore, a great interest is the increase in the quality of the credit assessment process when working with the people. When it comes to lending to the population, an important role in determining the creditworthiness is not so much the ability to repay the borrower's debt, but the willingness to pay the loan and pay interest on time. Readiness for this is different one; it depends on the personal characteristics of each person. These characteristics may include education, age, social class, gender, family status, etc. [7–9]. To analyze personal and financial indicators of an individual is a complex process for a financial consultant, which will result in the adoption of sound financial decisions. In order to minimize the subjectivity of a financial consultant and reducing the time to take decisions on lending to individuals use scoring [10, 11].

Scoring is a way to quickly evaluate a potential client. The result of it a client score. The received score can be used to solve various financial issues.

Scoring model of credit assessment is a mathematical model of the borrower's behavior based on the accumulated statistics. The result of the using is integral assessment of the risk in the view of the probability of repayment of the loan.

Therefore, the actual task is to develop a scoring model for assessing the creditworthiness of individuals, which will increase the speed of analysis of information about the client, reduce the time for approval of the decision on the loan and reduce the subjectivity of the assessment. And all of this will increase the quality of credit activity.

The object of study is the process of lending to individuals by credit institutions.

The subject of the study is the theoretical and methodological tool for assessing the client's creditworthiness by the use of a scorecard model.

The purpose of the work is to improve the quality of lending through the development and use of a scoring model that will satisfy the interests of the lending institution associated with the risk of non-repayment of credit.

1 PROBLEM STATEMENT

The problem of the assessment of creditworthiness is the task of classification, where the classes are customers from the database, which need to be classified according to their indicators into two groups: reliable clients, that is, the borrowers are creditworthy and unreliable when borrowers are uncreditworthy.

The formal formulation of the task of classifying clients can be presented in the following way. Let X is a set of clients of the bank, at the same time $X = \{x_1, ...x_m\}$. Let Y is a set of classes that need to be broken up by clients, that is $Y = \{y_1, ...y_k\}$. The task of classification is a reproduction of one set in another, in which each element of the first set becomes unambiguous with the particular element of the second set $a : X \to Y$.

To solve the problem of assessing the creditworthiness of a client it is necessary:

– to allocate a set of characteristics of the client – information about the borrower, which will be taken from the application form and documents provided by the borrower;

– to choose a method that will allow to determine the dependence between the characteristics of the client and the level of his creditworthiness;

– define the client class.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

At the present time almost all credit institutions use IT in solving many financial problems, including lending. Using IT can improve the quality of the results. An overview of IT used to assess the creditworthiness of individuals allows to emphases following IS:

1. The Ukrainian Bureau of Credit Histories (UBCI) [12] is an IS that provides such services: collection, processing, analysis, keeping of information, which is a credit history; providing legal and individual person with advisory services; providing credit reports

2. Mobile app "Credit History" is app from the Google Play service [13]. Functional abilities of IS: calculate a credit rating; see your credit history online and find out how to improve it; receive reminders for next payments; analyze personal finances and make informed financial decisions.

3. Online-banking Privat24 [14] is the IS for assessment creditworthiness of clients. To calculate the credit rating you need to go to the menu item "My accounts" → "Credit rating" and fill in the necessary information.

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

An analysis of existing IS for assessing creditworthiness in Ukraine shows that the main disadvantage is the secrecy of methods used by credit institutions to calculate credit score. Also, systems do not allow to change the indicators for the calculation of the rating credit assessment. Therefore, the results indicate the relevance of this study.

There are many methods to determine the credit rating, which have their advantages and disadvantages. All methods can be divided into two main groups: expert methods and scorecard models that use mathematical methods for processing information, such as Data Mining [15–19].

Expert methods are use only the experience and knowledge of a financial advisor, so this approach is characterized by a high degree of subjectivity and a high probability of error in deciding about issue a loan. The second group of methods is scoring. The scoring procedure using a scorecard model includes: information gathering, the construction of a mathematical model (the choice of the classification method and the definition of criteria for risk categories) and the distribution of creditors by risk category.

Among the main advantages of scoring systems, one can distinguish:

– lowering the loan non-repayment level;

– increasing speed and impartiality in decision making;

– possibility of effective management of a loan portfolio;

– absence of long-term training of the employee.

The main disadvantages of a scoring system for assessment of client's creditworthiness:

– high cost of adaptation of the used model under the current situation;

– the probability of a model error in determining the creditworthiness of a potential borrower is due to the subjective opinion of a specialist.

The methods and approaches in the scoring systems are quite diverse, they can be use both individually and in different combinations. An analytical review of the main known and currently used methods for assessing creditworthiness is presented in Table 1.

Comparing the methods of assessing the creditworthiness of the clients presented in the table above, one can conclude that the "Naïve" Bayesian classifier is a good classifier in the scoring model for processing information about a potential lender.

Table 1 – Review of methods for assessing creditworthiness

Method	Advantages	Disadvantages
Expert method	1. Experience and knowledge gained by credit experts. 2. Possibility of obtaining quantitative estimates in cases when there is no statistical information. 3. The speed of obtaining results due to the lack of complex mathematical calculations.	1. Big probability of model error in determining the creditworthiness of a potential borrower is due to the subjective opinion of a specialist. 2. Necessity of long-term training of the employee.
"Naive" classifier Bayes	1. Good results of classification. 2. Simple calculations. 3. Adaptation to new data. 4. High speed. 5. Modest memory requirements. 6. Small amount of training data. 7. Effectively works with categorical data.	1. Requires a sample containing all possible combinations of variables. 2. Assumptions for the independence of variables. 3. The need to convert different types of data to a category.
Discriminant analysis	1. Finding the strongest differences between classes – predictors. 2. Ability to restore missed values. 3. Possibility of solving the problem of classification of new data using past learning.	1. Works with interval data or with a scale of relationships. 2. There is a rather rough method for scoring of the assumptions of the linearity of the discriminatory function.
Logistic regression	1. Ability to choose the number of classes. 2. Ability to find an assessment of the likelihood of non-return of the loan.	1. Complex calculations for obtaining weight coefficients, so it needs a more powerful computer base and advanced computer security. 2. Sensitivity to correlation between characteristics. 3. Low resistance to errors. 4. Dependency on the data set.
Cluster analysis	1. Ability to classify multidimensional observations. 2. Ability to work with indicators that may have non-numeric character. 3. Ability to work on small sample sizes. 4. Possibility of calculations in the conditions of non-fulfillment of normal distribution of random variables.	1. The problem of choosing the distance metric in the space between the centers of the classes. 2. The problem of checking the adequacy of the results.
Decision trees	1. Simple to understand and interpret. 2. Does not require thorough preparation of data. 3. Ability to work both with categorical and interval variables. 4. Allows you to work with a large amount of information without special training procedures.	1. The problem of obtaining an optimal decision tree is NP-task. 2. The problem of retraining is the problem of creating too complex structures that do not sufficiently represent the data.
Neural Networks	1. Good results of classification. 2. Ability to change the structure of the network for new observations. 3. Ability to explain the rather complicated relationship between the values of risk factors and their level.	1. Great statistics for network learning are required. 2. The problem of choosing a network architecture is exist. 3. The difficulty of choosing a learning method is exist. 4 The complexity of calculations of weight coefficients between separate layers during training of a network is exist.

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

3 MATERIALS AND METHODS

The first step of assessing the client's creditworthiness with the help of the NBC is the choice of customer characteristics. Consider the most significant indicators that characterize the creditworthiness of clients, and their possible meaning:

– personal indicators;

– indicators on labor activity;

– financial indicators.

Personal indicators of client creditworthiness:

1) Sex = {Man, Woman}

2) Age = {< 25, 25–30, 30–35, 35–45, 45–50, 50–55, >55}

3) Family status = {Unmarried, Married}

4) Number of dependents = {0, 1, ≥ 2}

5) Education = {Secondary, Specialized Secondary, Higher}

6) Period of residence in the region = {< 1 year, 1–3, 3–5, 5–7, 7–10, 10–15, ≥ 15 years}

7) Location = {Center, Region}

Indicators on labor activity of client creditworthiness:

1) Branch of the company = {Banking and financial activity, Information Technology, Non-state medical services, Industry, Construction, Service, Transport and communications, Science or education or culture, State and social organizations, Policy, Agriculture, Other}

2) Enterprise class = {Small, Medium, Great}

3) Professional experience = {< 3, 3–5, 5–10, 10–15, > 15 years}

4) Experience in an enterprise = {<1, 1–3, 3–5, 5–7, 7–10, >10 years}

5) Position at an enterprise = {Manager, not a manager}

Financial indicators of client creditworthiness:

1) Own land = {Have, Have not}

2) Own country house = {Have, Have not}

3) Private property = {Have, Have not}

4) Garage = {Have, Have not}

5) Car = {Domestic, Foreign, Have not}

6) An apartment = {Have, Have not}

7) The area of the apartment = { Have not, from 18 to 25 square meters, 25–32, 32–50, 50–70, ≥ 70}

8) How did obtain an apartment = {Have not, Purchase, Gift}

The second stage of solving the problem of assessing the creditworthiness of a client with the help of NBC is the development of a scoring model. To do this, first of all, it is necessary to build a model of the business process of assessing the creditworthiness of the client. The notation IDEF0 was chosen for modeling process. It let to create the context level of the business process (Fig. 1). The input for the client's creditworthiness assessment process is a questionnaire. It contains general information about the client, financial and social. With the help of a scorecard model, a certain class of creditworthiness is assigned to the client. After IS make a decision to issue a loan. This process is a step-by-step process, therefore, for the implementation of this business process, are needed a loan expert and a financial advisor who is responsible for part of the procedures.

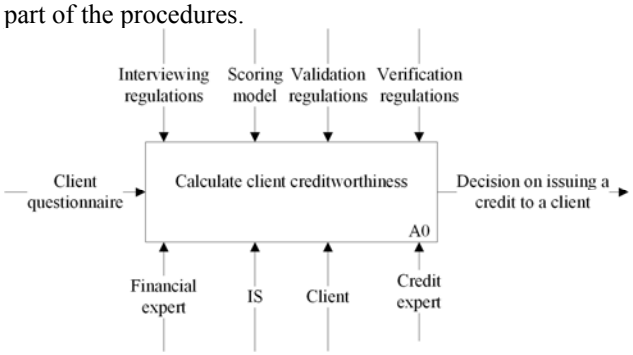


Figure1 – Context level of assessment of client creditworthiness

The list of procedures for evaluating the client's creditworthiness is presented at the next level of detail of the business process (Fig. 2).

The customer credit assessment process consists of four steps:

– an interview: at this stage, the financial consultant conducts a preliminary selection of clients by clarifying all conditions of credit;

– validation and verification of the questionnaire: at this stage, a credit expert with the help of the IS checks the correctness of filling in the questionnaire, and then the correspondence of the personal data to the real information of the client;

– scoring of the questionnaire: the result of this process is the assessment of the client's creditworthiness, which is calculated using a scoring model based on the Bayesian Classifier;

– decision on granting a loan: the final decision on the issue of a loan is taken at this stage.

A business process model for creditworthiness assessment is the basis for developing a scorecard model [15, 16, 20–22].

The NBC is a probabilistic classifier that uses the Bayesian theorem to determine the probability of belonging to the sample element to one of the classes assuming the independence of the variables. The Bayesian Classifier can be applied to any data set that can be represented as categorical data or list of features. A feature is any property that may be present or absent from the sample. The NBC is often very effective when working with the data despite assumptions about the independence of the features. Another important feature of the NBC is that classifier can be built on a new sample with missing values. The reason of it the assumption that the presence or absence of values of variables is completely random. In practice, the NBC, regardless of a number of shortcomings, has proved itself to be quite good due to the high speed of operation, simplicity, scalability and moderate memory requirements. Examples of using are:

– data classification in real time [19, 20];

– classification of texts, for example, spam filtering: Google Analytics and Yandex metrics confirm that Bayesian approach to classification has proven to be very good when it detects spam emails [23];

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

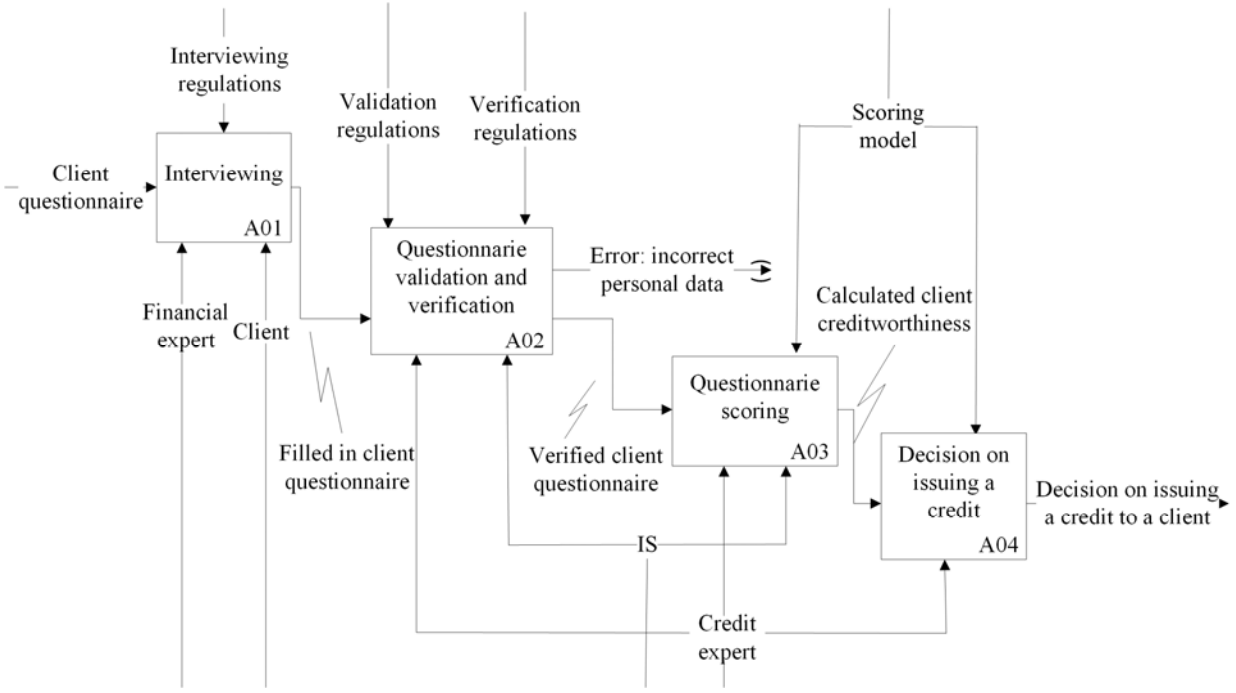


Figure 2 – Assessment process of client creditworthiness

– analysis of the tonality of the text: analysis of social media, identification of positive and negative clients; this approach, in conjunction with collaborative filtering, is implemented in advisory systems [24].

Let consider more detailed using of the NBC for calculating the credit rating. The algorithm of using the Bayesian Classifier to determine the client's creditworthiness consists of two steps:

1) training of the NBC – based on data of clients who have already been issued loans, and who in fact make a monthly contribution;

2) using of the NBC – credit rating is calculated for potential lenders.

Each new potential lender should be classified into one of two classes $Q=\{q_l\}, l=\overline{1,2}$: the first class q_1 includes those customers who can give a loan, the second one q_2 includes all other customers.

Taking into account the introduced notation, the customer classification algorithm using the Bayesian Classifier consists of the following steps.

1. Stage of training of the NBC:

I Select set of indicators I. Define set of each i-th characteristic meaning $J_i, i \in I$. Find value for $f_{ij}^k, k \in K, K = \overset{2}{\underset{l=1}{U}} K_l$ for each client and its output class $q_{lk}, l=\overline{1,2}$.

II Calculate number of j-th value of i-th indicator f_{ij}^k from all clients for each output class separately

$$x_{ij}^l = \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_l} f_{ij}^k, \quad K_l \in K, l=\overline{1,2}.$$

III Calculate number of l-th output class

$$y_l = \sum_{k \in K_l} q_{lk}.$$

IV Calculate conditional probability $P(f_{ij}/q_l)$ of j-th value of i-th indicator f_{ij} in output class q_l

$$P(f_{ij}/q_l) = \frac{x_{ij}^l}{\sum\limits_{j \in J_i} x_{ij}^l}.$$

V Calculate probability $P(q_l)$ of client's output class

$$P(q_l) = \frac{y_l}{\sum\limits_{l=1}^{2} y_l}.$$

2. Stage of using of the NBC:

VI Enter set of values $\{f_{ij}^{k+1}\}, j \in J_i, i \in I$ for checking $k+1$-th client.

VII Calculate conditional probability $P(q_l / \{f_{ij}^{k+1}\})$ of l-th client's output class according to the conditions $\{f_{ij}^{k+1}\}, j \in J_i, i \in I$

$$P(q_l / \{f_{ij}^{k+1}\}) = P(q_l) \cdot \prod_{i,j} P(f_{ij}/q_l), \; i \in I, j \in J_i.$$

VIII Assign of conditional probability to the probability $R(q_l)$ of the output class of $k+1$-th client

$$R(q_l) = P(q_l / \{f_{ij}^{k+1}\}).$$

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

IX Define output class of $k+1$-th client

$$q_{lk+1} = \arg\max_{l=1,2} R(q_l).$$

For the automation of the calculating process of the credit rating is using a scoring model. The following IS functionality is proposed, which is presented in the form of a use-case diagram (Fig. 3). This diagram shows the user of the IS and all the actions that he can perform. Consider these options for use in more detail way.

In order to work with customer data: to view, to edit, to enter new data, the option "Management client's data" is provided. By analogy, the option "Management indicators" allows to work with the characteristics used in the scoring model.

The main task of the IS is to assess the creditworthiness of a client. The use case "Calculate creditworthiness" is responsible for it. This functionality involves the use of a scorecard model and the generation of a relevant report on the creditworthiness assessment of clients. The report can be saved to file or can be showed on the screen. The use cases "Use Scoring Model", "Generate Report", "Save to File", "Display to Screen" are responsible for these functionality accordingly. The use case "Get some help" is showing information about the program and FAQ.

The classical three-level architecture is proposed for IS. Each element of architecture is at its own level and responsible for the implementation of a limited set of functions. IS architecture is shown in Fig. 4 in the form of a deployment diagram where it is possible to separate 3 main nodes presented by devices of different purposes.

The client part is presented with the graphical interface of the web application. For efficient operation of IS, customer information is stored in a database that should be located on one of the servers of the credit institution. Also this database can has information about authorizing and accessing the database as a separate entities in the database. In order to access the databases, it is necessary to make requests from client part, which is presented as a web application. The web server retrieves the requests to database. The results of the request (sampling and processing) the web server will return to the client part.

The following model of the database is proposed for storing information on existing and potential lenders (Fig. 5).

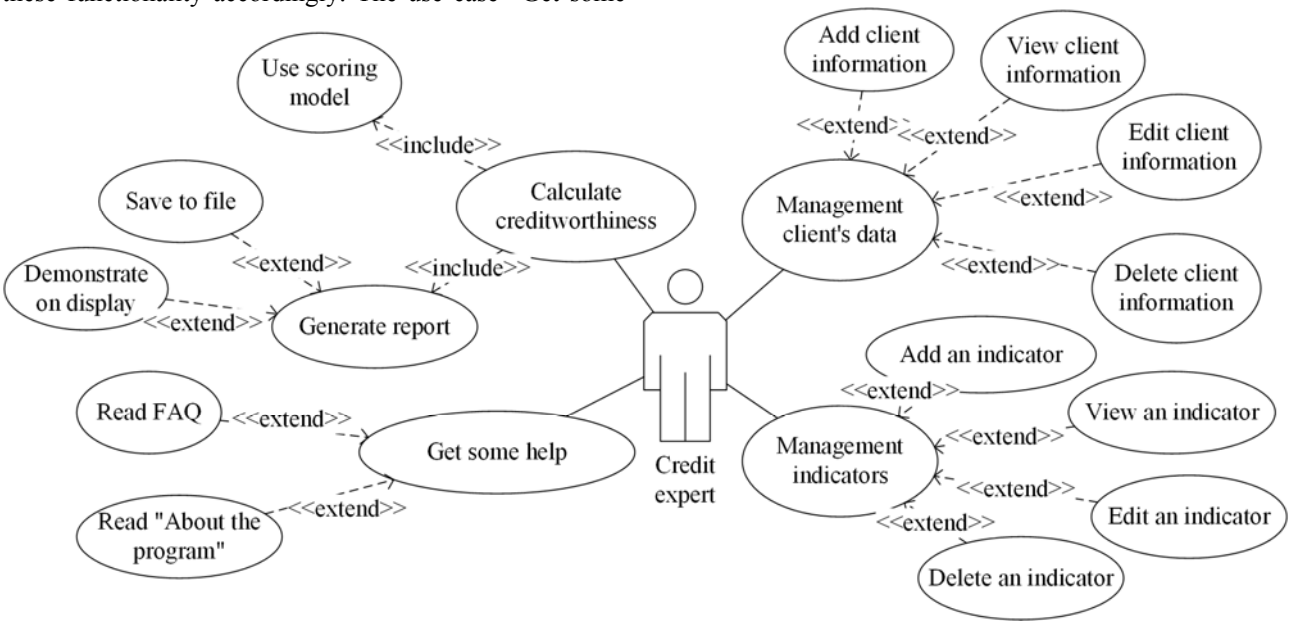


Figure 3 – Use case diagram

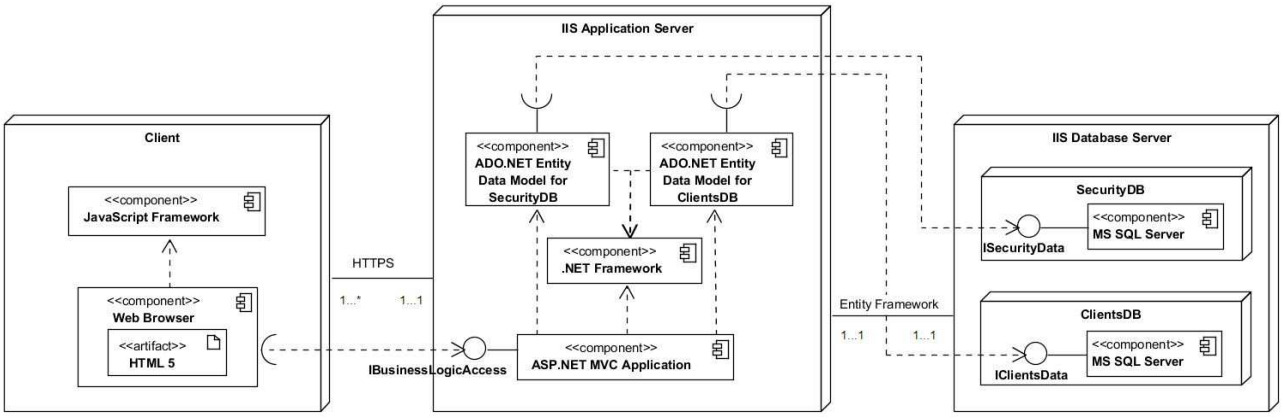


Figure 4 – Deployment diagram

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

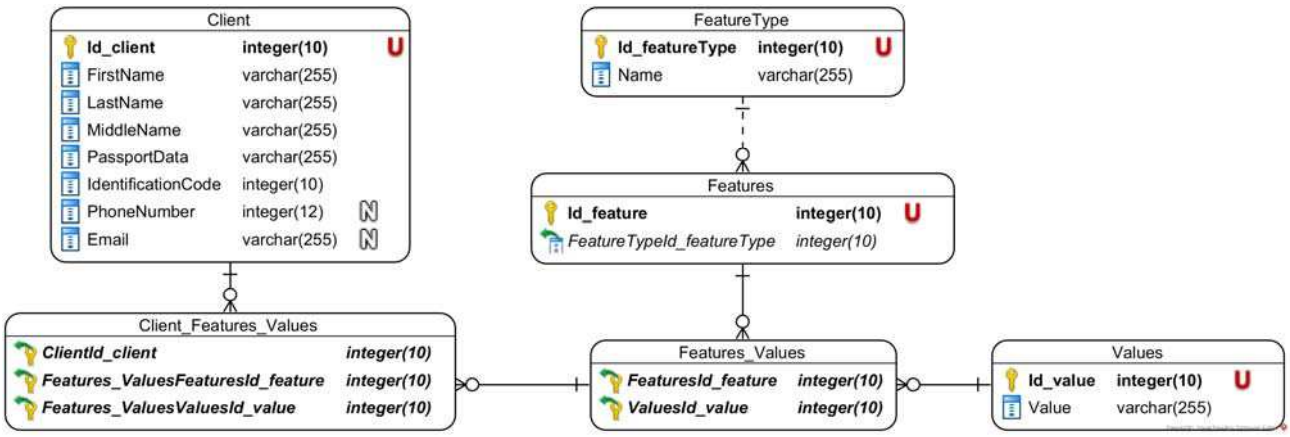


Figure 5 – Database model

The structure of Database model is consist of 6-th entities (Table 2):

– the entity of "Client" corresponds to the main data about clients of a credit institution;

– the entity "FeatureType" describes a group of indicators used to assess the creditworthiness of clients;

– the entity "Features" is a vocabulary for the indicators used for the scorecard model;

– the entity "Values" describes all possible values of all indicators;

– the associative entity "Features_Values" describes the relationship between the entities «Features» and «Values»;

– the associative entity "Client_Features_Values" creates an interconnection between the entities "Client" and "Features_Values".

Table 2 – Description of client database model

Attribute	Attribute description
Entity "Client"	
Id_client	Client's Id
FirstName	Client's name
LastName	Surname
MiddleName	Third name
PassportData	Passport
IdentificationCode	Code of Physical Entity
PhoneNumber	Phone Number
Email	Email
Entity "FeatureType"	
Id_featureType	Id of Feature Group
Name	Group name
Entity "Features"	
Id_feature	Id of Feature
FeatureTypeId_featureType	Type of feature
Entity "Values"	
Id_value	Id of feature value
Value	Value of feature
Entity "Features_Values"	
FeaturesId_feature	Id of Feature
ValuesId_value	Id of feature value
Entity "Client_Features_Values"	
ClientId_client	Client's Id
Features_ValuesFeaturesId_feature	Id of Feature
Features_ValuesValuesId_value	Id of feature value

So, a scorecard model based on NBC and IS was proposed, which automates the process of solving the client's creditworthiness assessment task.

4 EXPERIMENTS

For the training of the Bayesian Classifier the data was used for 113 clients who have already been issued a loan or have been denied. Granting a loan was the case if the last line received the value of "1". An example of input data is presented in Table 3.

Table 3 – Fragment of set with training data

	Set 1	Set 2	....	Set 113
Loan amount	7000	7500	....	10000
Loan term	6	6	....	12
Sex	woman	man	...	woman
Age	37	38	...	41
Family status	Unmarried	Unmarried	....	Married
Number of dependents	2	2	....	2
Education	Higher	Secondary	....	Secondary
Period of residence in the region	22	12	....	21
Location	Region	Center	....	Center
Branch of the company	Industry	Service		Other
Enterprise class	Medium	Small	....	Medium
Professional experience	5	8	....	5
Experience in an enterprise	>10	>10	....	9
Position at an enterprise	not a manager	not a manager	....	not a manager
Own land	Have not	Have not	....	Have
Own country house	Have	Have	....	Have not
Private property	Have not	Have	....	Have not
Garage	Have	Have not	....	Have not
Car	Domestic	Foreign	....	Domestic
An apartment	Have not	Have	....	Have
The area of the apartment	37	29	....	38
How did obtain an apartment	Have not	Have not	....	Have not
To give a loan	1	1	....	0

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

All information from the Table 3 was divided into three types of indicators: personal indicators, indicators on labor activity, and financial indicators. After that each indicator obtained appropriate meaning.

5 RESULTS

The calculation of the creditworthiness of clients is based on the trained Bayesian classifier. Using the NBC was conducted on the example of three clients, one of them was denied in the loan, for the second and third one scoring model calculated the value of the credit assessment, which corresponds to the economic expediency of the loan. Example of calculated results and client's information according to table 3 are presented below.

Client 143 = {25500; 12; man; 25 – 30; unmarried; 0; higher; 1 – 3; Center; Service; Medium; < 3; <1; not a manager; Have not; Have not; Have not; Have not; Have not; Have not; Have not; Have not; 0}

Client 97 = {14500; 12; man; >55; married; 1; higher; ≥ 15 years; Center; Banking and financial activity; Great; > 15 years; 7 – 10; Manager; Have; Have; Have; Have; Foreign; Have not; 32 – 50; Have not; 1}

Client 136 = {17000; 24; man; 30–35; married; 1; higher; ≥ 15 years; Center; Information Technology; Medium; 5 – 10; 3 – 5; Manager; Have not; Have not; Have; Have; Foreign; Have; 18 – 25; Gift; 1}

Clients 97 and 136 have a good credit assessment, so they can obtain the loan. Another one doesn't have any financial support, so his credit value is very small for issuing the loan.

The issuance of money to the client, which the scoring model has calculated the positive value of the credit assessment, occurs after signing by the bank and the client of the loan agreement and other agreements (mortgages, guarantees of commercial pledge, etc.).

6 DISCUSSION

To use the developed IS in real conditions, it is necessary to overcome the adequacy of the scoring model. To do this, it is necessary to check the quality of the proposed classifier, which is the basis for making decisions in the credit activity. For the checking NBC we used client's data, which did not use in the training classifier.

The quality of credit activity is an integral characteristic of a process that shows the degree of suitability of a process for achieving certain goals. To assess the quality of the classifier, we can use the following quality indicators: precision, recall, measure of Van Risbergen [25, 26].

Precision is a criterion that shows the proportion of clients that really belong to a particular class with respect to all clients that IS has identified about this class: $P = \frac{a}{a+b}$. The more precision, the fewer the number of false alarms.

Recall is a quality metric that shows the proportion of clients that really belong to a particular class with respect to all clients from this class: $R = \frac{a}{a+c}$. The more recall of the data obtained from the IS, the greater the benefit of the received information.

A good metric for a joint assessment of precision and recall is the F-measure or measure of Van Risbergen, which is defined as the weighted harmonic average of precision and recall: $F = \frac{2PR}{P+R}$.

To check the quality of the work of the NBC 61 clients were taken, which were not used in the training. A series of experiments were carried out with different conditions. Firstly, the NBC obtained 61 cards for verification, then some of these cards were used for training, and the remainder was again checked for the definition of customer classes. The process was repeated until all data was used. The results of the experiments are shown in table 4. We can also evaluate the client class definition error: $Error = \frac{a+c}{number\ of\ clients}$.

Table 4 – Result of checking NBC

№	a	b	c	Number of clients	P	R	F	Error
1	33	5	3	61	0,87	0,92	0,89	0,13
2	25	4	2	52	0,86	0,93	0,89	0,12
3	23	2	2	43	0,92	0,92	0,92	0,09
4	23	2	1	37	0,92	0,96	0,94	0,08
5	15	1	1	20	0,94	0,94	0,94	0,10
6	10	1	0	16	0,91	1,00	0,95	0,06

As can be seen from Table 4, as the training pattern increases the Van Riesbergen measure increases (Fig. 6). The error in determining the client's credit rating decreases.

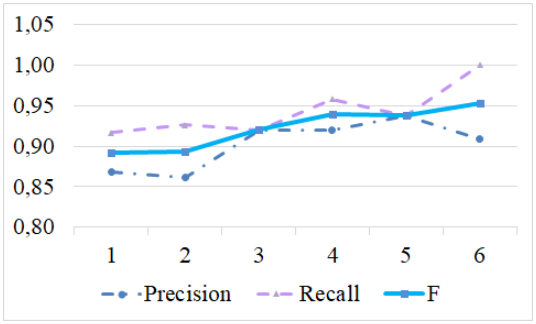


Figure 6 – Quality metrics

The IS considered earlier [12–14] are characterized by the closeness of the scoring model used for decision making. This restriction does not allow doing many experiments to test the performance of these IS.

The conducted studies and the obtained results show the feasibility of using the proposed scoring model and the developed IS in real conditions.

CONCLUSIONS

In the course of this research, the task of assessing the creditworthiness of a potential creditor was solved. To do this, an analytical review of the main methods for assessing creditworthiness was conducted. Result of it is the method of scoring-analysis based on Data Mining tech-

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

nology. A scorecard model for calculating the credit rating based on the use of the NBC was developed.

A design stage of IS was conducted, during which a diagram of activity was developed for a clear presentation of the work of the classification algorithm, a use-case diagram was developed for allocating functional capabilities, a deployment diagram was developed for representing the architecture of the IS. A database model was developed that allows the knowledge domain to be structured. The conducted pilot studies have shown **the practical significance** of the results for credit institutions, as evidenced by the calculated assessment of the quality of credit activity.

The scientific novelty of the obtained results consists in improving the client's credit rating process by using the scoring model based on NBC, which reduced the subjective factor in decision making and also reduced the time for processing information about a potential creditor.

The results obtained in the course of this research work indicate the feasibility of using the proposed solution under real conditions in credit institutions to increase the quality of lending activities.

Prospects for further research are to automate the process of selecting informative indicators of customer creditworthiness.

REFERENCES

1. Bank Lending Survey [Electronic resource] / Access mode: https://bank.gov.ua/control/en/publish/category;jsessionid=4AEC639346EC2333E34BA6A8D94B48CA?cat_id=20741795, 03.12.2018.
2. Carlson Mark, Shan Hui, Warusawitharana Missaka Capital ratios and bank lending: A matched bank approach, *Journal of Financial Intermediation*, 2013, Volume 22, Issue 4, pp. 663–687. https://doi.org/10.1016/j.jfi.2013.06.003
3. Ling Kock Sheng, Teh Ying Wah A comparative study of data mining techniques in predicting consumers' credit card risk in banks, *African Journal of Business Management,* 2011, Vol. 5 (20), pp. 8307–8312.
4. Polozhennya pro kredituvannya, zatv. Postanovoyu Pravlinnya NBU 28.09.1995 № 246, *Pravove regulyuvannya kreditnix vidnosin v Ukraïni: 36 normat. Aktiv*, Kiev, Yurinkom Inter, 2001, pp. 53–66.
5. Kevin Johnston. How to Evaluate a Firm's Credit Worthiness [Electronic resource], Access mode: https://smallbusiness.chron.com/evaluate-firms-credit-worthiness-25925.html, 30.11.2018.
6. Celan Bryant. How to Determine The Creditworthiness of a Customer [Electronic resource], Access mode: https://blog.apruve.com/how-to-determine-the-creditworthiness-of-a-customer. – 03.12.2018.
7. Motwani A., Chaurasiya P., Bajaj G. Predicting Credit Worthiness of Bank Customer with Machine Learning Over Cloud, *International journal of computer sciences and engineering*, 2018, No. 6(7), pp. 1471–1477. DOI: 10.26438/ijcse/v6i7.14711477
8. Shvidkij A. I., Miroshnichenko A. A. Metody ocenki kreditosposobnosti korporativnyx klientov kommercheskogo banka: rossijskij i zarubezhnyj opyt, *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyx i fundamental'nyx issledovanij*, 2016, No. 7–4, pp. 667–672.
9. Gotovchikov I. F. Prakticheskij metod e'kspress-ocenki finansovyx vozmozhnostej fizicheskix i yuridicheskix lic, *Bankovskoe kreditovanie,* 2009, No. 3, P. 115.
10. Pramod S. Pati, Aghav Dr. J. V., Sareen Vikram An Overview of Classification Algorithms and Ensemble Methods in Personal Credit Scoring, *International Journal of Computer Science and technology*, 2016, Vol. 7, Issue 2, pp. 183–188.
11. Thabiso Peter Mpofu, Mukosera Macdonald Credit Scoring Techniques: A Survey, *International Journal of Computer Science and technology*, 2014, Vol. 3, Issue 8, pp. 165–168.
12. Ukrainian bureau credit history [Electronic resource] Access mode: https://ubki.ua/ua . 05.12.2018.
13. Mobile app "Credit history" [Electronic resource] Access mode:https://play.google.com/store/apps/details?id=ua.ubki&hl=uk . 05.12.2018.
14. Internet-bank Privat24 [Electronic resource], Access mode: https://www.privat24.ua/ . 10.12.2018.
15. Eibe Frank, Mark A. Hall, Christopher J. Palestro and Ian H. Witten Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, *Elsevier Science & Technology Books*, 2016, 654 p.
16. Kesavaraj G., Sukumaran S. A study on classification techniques in data mining, *Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies, Tiruchengode,* 2013, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ICCCNT.2013.6726842
17. Mel'nik K. V., Єrshova S. I. Problemy i osnovnye podxody k resheniyu zadachi medicinskoj diagnostiki, *Sistemi obrobki informacii*, 2011, No. 2 (92), pp. 244–248.
18. Mariya Yao, Adelyn Zhou, Marlene Jia Applied Artificial Intelligence: A Handbook For Business Leaders Paperback, *Topbots Inc*, 2018, 228 p.
19. Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville. Deep Learning, MIT Press, 2016, 800 p.
20. Naive Bayes Classifiers [Electronic resource], Access mode: https://www.geeksforgeeks.org/naive-bayes-classifiers/, 04.12.2018.
21. Mel'nik K. V., Glushko V. N. Primenenie apparata Bajesovyx setej pri obrabotke dannyx iz medicinskix kartochek, *Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Sciences,* 2013, I (2), Issue 15, pp. 126–129. Vengriya, Budapesht.
22. Mel'nik K. V., Goloskokov A. E. Ispol'zovanie setej doveriya dlya zadachi skrininga, T*ezi dopovidej mizhnarodnoï naukovo-praktichnoï konferenciï «Informacijni texnologiï: nauka, texnika, texnologiya, osvita, zdorov'ya».* Xarkiv, NTU «XPI», 2014, P. 14.
23. Google Analytics Referral Spam [Electronic resource], Access mode: https://medium.com/@lenguyenthedat/google-analytics-referral-spam-85bb6b7aed2b, 02.11.2018.
24. Koji Miyahara, Michael J. Pazzani Improvement of Collaborative Filtering with the Simple Bayesian Classifier [Electronic resource], University of California, Irvine. Access mode: https://www.ics.uci.edu/~pazzani/Publications/IPSJ.pdf. 01.12.2018.
25. Mel'nik K. V. Ocinka yakosti medichnoï informaciï, *Materiali Mizhnarodnoï naukovo-praktichnoï konferenciï "Problemi i perspektivi rozvitku IT industriï*". Xar'kov, XNEU imeni Semena Kuznecya, 2018, P. 70.
26. Woodall P. M., Oberhofer M., & Borek A. A Classification of Data Quality Assessment and Improvement Methods, *International Journal of Information Quality,* 2014, No. 3. https://doi.org/10.1504/IJIQ.2014.068656.

Received 10.12.2018.
Accepted 12.02.2019.

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

УДК 004.9

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КРЕДИТНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ СКОРИНГОВОЇ МОДЕЛІ

Мельник К. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри Програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Борисова Н. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри Інтелектуальних комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто проблему оцінки кредитоспроможності клієнта. Вона являє собою одночасну обробку даних кредитора різної природи з подальшим визначенням кредитного рейтингу. Об'єктом даного дослідження виступав процес кредитування фізичних осіб кредитними установами.

Ціль. Ціль роботи є дослідження процесу підвищення якості кредитної діяльності за рахунок розробки і використання скорингової моделі.

Метод. Проведено аналітичний огляд предметної області. Розроблено модель бізнес-процесу оцінювання кредитоспроможності клієнтів у вигляді IDEF0 діаграми. Виділені групи показників, які характеризують потенційного кредитора з різних боків. Обрані набори значень для кожного показника кредитоспроможності окремо. Проаналізовано методи вирішення задачі оцінки кредитоспроможності клієнтів. Обрано наївний класифікатор Байєсу як метод вирішення задачі класифікації потенційних кредиторів. Проаналізовано існуючі інформаційні системи для оцінки кредитоспроможності клієнтів. Розроблено скорингову модель оцінки кредитного рейтингу клієнту у вигляді алгоритму. Визначено перелік функціональних можливостей інформаційної системи, які представлено у вигляді діаграми варіантів використання. Запропоновано трирівневу архітектуру для інформаційної системи. Розроблено модель бази даних для збереження інформації щодо клієнтів. Розроблено інформаційну систему для визначення кредитного рейтингу клієнту на основі використання розробленої скорингової моделі. Проведено чисельні дослідження визначення класу потенційного кредитора. Проаналізовано процес визначення якості кредитної діяльності. Обрано показники якості визначення оцінки кредитоспроможності клієнтів. Запропоновано спосіб розрахунку якості кредитної діяльності.

Результати. Розроблено скорингову модель, яка була використана при вирішенні оцінки кредитоспроможності клієнтів за допомогою запропонованої інформаційної системи. Досліджено процес підвищення якості оцінки кредитного рейтингу.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили значимість запропонованої скорингової моделі та дозволяють рекомендувати її для використання на практиці для аналізу процесу кредитоспроможності клієнтів. Наукова новизна полягає в удосконаленні процесу кредитної діяльності за рахунок автоматизації використання наївного класифікатора Байєсу, що дозволяє зменшити людський фактор при прийнятті рішень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: скорингова модель, задача класифікації, наївний байєсівський класифікатор, оцінка кредитного рейтингу, кредитування, позичальник, кредитор, кредитоспроможність.

УДК 004.9

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КРЕДИТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКОРИНГОВОЙ МОДЕЛИ

Мельник К. В. – кандидат технических наук, доцент кафедры Программной инженерии и информационных технологий управления, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина.

Борисова Н. В. – кандидат технических наук, доцент кафедры интеллектуальных компьютерных систем, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена проблема оценки кредитоспособности клиента, которая представляет собой одновременную обработку данных кредитора различной природы с последующим определением кредитного рейтинга. Объектом данного исследования выступал процесс кредитования физических лиц кредитными учреждениями.

Цель. Целью работы является исследование процесса повышения качества кредитной деятельности за счет разработки и использования скоринговой модели.

Метод. Проведен аналитический обзор предметной области. Разработана модель бизнес-процесса оценки кредитоспособности клиентов в виде IDEF0 диаграммы. Выделены группы показателей, характеризующих потенциального кредитора с разных сторон. Определены наборы значений для каждого показателя кредитоспособности отдельно. Проанализированы методы решения задачи оценки кредитоспособности клиентов. Избран наивный классификатор Байеса как метод решения задачи классификации потенциальных кредиторов. Проанализированы существующие информационные системы для оценки кредитоспособности клиентов. Разработана скоринговая модель оценки кредитного рейтинга клиента в виде алгоритма. Определен перечень функциональных возможностей информационной системы, представленных в виде диаграммы вариантов использования. Предложена трехуровневая архитектура информационной системы. Разработана модель базы данных для хранения информации о клиентах. Разработана информационная система для определения кредитного рейтинга клиенту на основе использования предложенной скоринговой модели. Проведены численные исследования определения класса потенциального кредитора. Проанализирован процесс определения качества кредитной деятельности. Выбраны показатели качества определения оценки кредитоспособности клиентов. Предложен способ расчета качества кредитной деятельности.

Результаты. Разработана скоринговая модель, которая была использована при оценке кредитоспособности клиентов с помощью предложенной информационной системы. Исследован процесс повышения качества оценки кредитного рейтинга.

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили значимость предложенной скоринговой модели и позволяют рекомендовать ее для использования на практике для анализа процесса кредитоспособности клиентов. Научная новизна заключается в усовершенствовании процесса кредитной деятельности за счет автоматизации использования наивного классификатора Байеса, что позволяет уменьшить человеческий фактор при принятии решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: скоринговая модель, задача классификации, наивный байесовский классификатор, оценка кредитного рейтингу, кредитование, заемщик, кредитор, кредитоспособность.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Bank Lending Survey [Electronic resource] / Access mode: https://bank.gov.ua/control/en/publish/category;jsessionid=4AEC639346EC2333E34BA6A8D94B48CA?cat_id=20741795 . – 03.12.2018.
2. Mark Carlson. Capital ratios and bank lending: A matched bank approach / Mark Carlson, Hui Shan, Missaka Warusawitharana // Journal of Financial Intermediation. – 2013. – Volume 22, Issue 4. – P. 663–687. https://doi.org/10.1016/j.jfi.2013.06.003
3. Ling Kock Sheng. A comparative study of data mining techniques in predicting consumers' credit card risk in banks / Ling Kock Sheng and Teh Ying Wah // African Journal of Business Management. – 2011. – Vol. 5 (20). – P. 8307–8312.
4. Положення про кредитування / затв. Постановою Правління НБУ 28.09.1995 № 246 // Правове регулювання кредитних відносин в Україні: 36 нормат. Актів. – К. : Юрінком Інтер, 2001. – С. 53–66.
5. Kevin Johnston. How to Evaluate a Firm's Credit Worthiness [Electronic resource] / Kevin Johnston. – Access mode: https://smallbusiness.chron.com/evaluate-firms-credit-worthiness-25925.html . – 30.11.2018.
6. Celan Bryant. How to Determine The Creditworthiness of a Customer [Electronic resource] / Celan Bryant. – Access mode: https://blog.apruve.com/how-to-determine-the-creditworthiness-of-a-customer. – 03.12.2018.
7. Motwani A. Predicting Credit Worthiness of Bank Customer with Machine Learning Over Cloud / A. Motwani, P. Chaurasiya, G. Bajaj // International journal of computer sciences and engineering. – 2018. – № 6(7). – P. 1471–1477. DOI: 10.26438/ijcse/v6i7.14711477
8. Швидкий А. И. Методы оценки кредитоспособности корпоративных клиентов коммерческого банка: российский и зарубежный опыт / А. И. Швидкий, А. А. Мирошниченко // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 7–4. – С. 667–672.
9. Готовчиков И. Ф. Практический метод экспресс-оценки финансовых возможностей физических и юридических лиц / И. Ф. Готовчиков // Банковское кредитование. – 2009. – № 3. – С. 115.
10. Pramod S. Patil. An Overview of Classification Algorithms and Ensemble Methods in Personal Credit Scoring / Pramod S. Patil, Dr. J. V. Aghav, Vikram Sareen // International Journal of Computer Science and technology. – Vol. 7, Issue 2. – 2016. – P. 183–188.
11. Thabiso Peter Mpofu. Credit Scoring Techniques: A Survey / Thabiso Peter Mpofu, Macdonald Mukosera // International Journal of Computer Science and technology. – 2014. – Vol. 3, Issue 8. – P. 165–168.
12. Ukrainian bureau credit history [Electronic resource] / Access mode: https://ubki.ua/ua . – 05.12.2018.
13. Mobile app "Credit history" [Electronic resource] / Access mode: https://play.google.com/store/apps/details?id=ua.ubki&hl=uk. – 05.12.2018.
14. Internet-bank Privat24 [Electronic resource] / Access mode: https://www.privat24.ua/ . – 10.12.2018.
15. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques / [Eibe Frank, Mark A. Hall, Christopher J. Palestro and Ian H. Witten] // Elsevier Science & Technology Books, 2016. – 654 p.
16. Kesavaraj G. A study on classification techniques in data mining / G. Kesavaraj and S. Sukumaran // Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies, Tiruchengode, 2013. – P. 1–7. doi: 10.1109/ICCCNT.2013.6726842
17. Мельник К. В. Проблемы и основные подходы к решению задачи медицинской диагностики / К. В. Мельник, С. І. Єршова // Системи обробки інформації. – 2011. – № 2 (92). – С. 244–248.
18. Mariya Yao. Applied Artificial Intelligence: A Handbook For Business Leaders Paperback / Mariya Yao, Adelyn Zhou, Marlene Jia // Topbots Inc. – 2018. – 228 p.
19. Ian Goodfellow. Deep Learning / Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville // MIT Press, 2016. – 800 p.
20. Naive Bayes Classifiers [Electronic resource] / Access mode: https://www.geeksforgeeks.org/naive-bayes-classifiers/ . – 04.12.2018.
21. Мельник К. В. Применение аппарата Байесовых сетей при обработке данных из медицинских карточек / К. В. Мельник, В. Н. Глушко // Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Sciences. – 2013. – I (2), Issue 15. – P. 126–129. Венгрия, Будапешт.
22. Мельник К. В. Использование сетей доверия для задачи скрининга / К. В. Мельник, А. Е. Голоскоков // Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – С. 14.
23. Google Analytics Referral Spam [Electronic resource] / Access mode: https://medium.com/@lenguyenthedat/google-analytics-referral-spam-85bb6b7aed2b . – 02.11.2018.
24. Koji Miyahara. Improvement of Collaborative Filtering with the Simple Bayesian Classifier [Electronic resource] / Koji Miyahara and Michael J. Pazzani. – University of California, Irvine. – Access mode: https://www.ics.uci.edu/~pazzani/Publications/IPSJ.pdf. – 01.12.2018.
25. Мельник К. В. Оцінка якості медичної інформації / К. В. Мельник // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку IT індустрії». – Х. : ХНЕУ імені Семена Кузнеця, 2018. – С. 70.
26. Woodall P. M. A Classification of Data Quality Assessment and Improvement Methods / P. M. Woodall, M. Oberhofer, & A. Borek // International Journal of Information Quality. – 2014. – № 3. https://doi.org/10.1504/IJIQ.2014.068656.

© Melnyk K. V, Borysova N. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-7

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

УДК 621.391.1: 621.395

АНАЛИЗ ДВУХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ $HE_2/M/1$ С ОБЫЧНЫМИ И СДВИНУТЫМИ ВХОДНЫМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ

Тарасов В. Н. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения и управления в технических системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Россия.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В теории массового обслуживания исследования систем G/M/1 и G/G/1 актуальны в связи с тем, что до сих пор не существует решения в конечном виде для общего случая при произвольных законах распределений входного потока и времени обслуживания. Рассмотрена задача вывода решения для среднего времени ожидания в очереди в замкнутой форме для двух систем с обычными и со сдвинутыми гиперэрланговскими и экспоненциальными входными распределениями.

Цель работы. Получение решения для основной характеристики системы – среднего времени ожидания требований в очереди для двух систем массового обслуживания типа G/M/1 и G/G/1 с обычными и со сдвинутыми гиперэрланговскими и экспоненциальными входными распределениями.

Метод. Для решения поставленной задачи использован классический метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли. Данный метод позволяет получить решение для среднего времени ожидания для рассматриваемых систем в замкнутой форме. Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли играет важную роль в теории систем G/G/1. Для практического применения полученных результатов использован известный метод моментов теории вероятностей.

Результаты. Впервые получены спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для двух систем, с помощью которых выведены расчетные выражения для среднего времени ожидания в очереди в замкнутой форме.

Выводы. Получены спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для рассматриваемых систем и с их помощью выведены расчетные выражения для среднего времени ожидания в очереди для этих систем в замкнутой форме. Эти выражения расширяют и дополняют известные формулы теории массового обслуживания для среднего времени ожидания для систем G/M/1 и G/G/1 с произвольными законами распределений входного потока и времени обслуживания. Такой подход позволяет рассчитать среднее время ожидания для указанных систем в математических пакетах для широкого диапазона изменения параметров трафика. Все остальные характеристики систем являются производными от времени ожидания.

Кроме среднего времени ожидания, такой подход дает возможность определить и моменты высших порядков времени ожидания. Учитывая тот факт, что вариация задержки пакетов (джиттер) в телекоммуникациях определяется как разброс времени ожидания от его среднего значения, то джиттер можно будет определить через дисперсию времени ожидания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гиперэрланговский и экспоненциальный законы распределения, интегральное уравнение Линдли, метод спектрального разложения, преобразование Лапласа.

СОКРАЩЕНИЯ

ИУЛ – интегральное уравнение Линдли;
СМО – система массового обслуживания;
ФРВ – функция распределения вероятностей.

НОМЕНКЛАТУРА

$a(t)$ – функция плотности распределения интервалов между поступлениями требований;

$A^*(s)$ – преобразование Лапласа функции $a(t)$;

$b(t)$ – функция плотности распределения времени обслуживания;

$B^*(s)$ – преобразование Лапласа функции $b(t)$;

c_λ – коэффициент вариации интервалов поступлений требований;

c_μ – коэффициент вариации времени обслуживания;

D_W – дисперсия времени ожидания;

HE_2 – гиперэрланговское распределение второго порядка;

HE_2^- – сдвинутое гиперэрланговское распределение второго порядка;

G – произвольный закон распределения;

M – экспоненциальный закон распределения;

M^- – сдвинутый экспоненциальный закон распределения;

$\bar{W}$ – среднее время ожидания в очереди;

$W^*(s)$ – преобразование Лапласа функции плотности времени ожидания;

$W(y)$ – ФРВ времени ожидания требования в очереди;

z – любое число из интервала (–1, 1);

λ – интенсивность входного потока;

λ_1 – первый параметр гиперэрланговского распределения входного потока;

λ_2 – второй параметр гиперэрланговского распределения входного потока;

μ – интенсивность обслуживания и параметр экспоненциального распределения;

© Тарасов В. Н., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-8

ρ – коэффициент загрузки системы;

$\overline{\tau}_\lambda$ – средний интервал между поступлениями требований;

$\overline{\tau}_\lambda^2$ – второй начальный момент интервала между поступлениями требований;

$\overline{\tau}_\mu$ – среднее время обслуживания;

$\overline{\tau_\mu^2}$ – второй начальный момент времени обслуживания;

$\Phi_+(s)$ – преобразование Лапласа ФРВ времени ожидания;

$\psi_+(s)$ – первая компонента спектрального разложения;

$\psi_-(s)$ – вторая компонента спектрального разложения.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья посвящена анализу СМО $HE_2/M/1$ с обычными и со сдвинутыми гиперэрланговскими (HE_2) и экспоненциальными (M) входными распределениями. В открытом доступе автору не удалось обнаружить результаты для среднего времени ожидания требований в очереди в таких СМО. Как известно из теории массового обслуживания, среднее время ожидания является главной характеристикой для любых СМО. По этой характеристике, например, оценивают задержки пакетов в сетях пакетной коммутации при их моделировании с помощью СМО. Рассматриваемая СМО с обычными входными распределениями $HE_2/M/1$ относится к типу G/M/1, а СМО со сдвинутыми распределениями относится к типу G/G/1.

В теории массового обслуживания исследования систем G/M/1 и G/G/1 актуальны в связи с тем, что они активно используются в современной теории телетрафика, к тому же до сих пор не существует решения для таких систем в конечном виде для общего случая.

В исследовании систем G/G/1 важную роль играет метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли и большинство результатов в теории массового обслуживания получены именно с помощью данного метода.

Объектом исследования является СМО типа G/M/1 и G/G/1.

Предметом исследования является среднее время ожидания в системах $HE_2/M/1$ и $HE_2^- / M^- / 1$.

Целью работы является получение решения в замкнутой форме для основной характеристики системы – среднего времени ожидания требований в очереди для вышеперечисленных СМО.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе автора [1] впервые приведены результаты по исследованию систем с гиперэкспоненциальными и экспоненциальными входными распределениями, полученные с помощью метода спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли (ИУЛ). Результаты работы [1] позволяют развить теорию данного метода также на гиперэрланговское распределение.

Одна из форм интегрального уравнения Линдли выглядит так [2, 3]:

$$W(y)=\begin{cases}\int\limits_{-\infty}^{y} W(y-u)\,\mathrm{d}C(u), & y\ge 0;\\ 0, & y<0.\end{cases}$$

При кратком изложении метода спектрального разложения решения ИУЛ будем придерживаться подхода и символики автора классики теории массового обслуживания [2]. Суть решения ИУЛ методом спектрального разложения состоит в нахождении закона распределения времени ожидания через следующее спектральное разложение: $A^*(-s)\cdot B^*(s)-1=\psi_+(s)/\psi_-(s)$, где $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ некоторые рациональные функции от s, которые можно разложить на множители. Функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ должны удовлетворять следующим условиям согласно [2]:

– для $\mathrm{Re}(s)>0$ функция $\psi_+(s)$ является аналитической без нулей в этой полуплоскости;

– для $\mathrm{Re}(s)<D$ функция $\psi_-(s)$ является аналитической без нулей в этой полуплоскости, где D – некоторая положительная константа, определяемая из условия: $\lim\limits_{t\to\infty}\dfrac{a(t)}{e^{-Dt}}<\infty$. (1)

Кроме того, функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ должны удовлетворять следующим условиям:

$$\lim_{|s|\to\infty,\,\mathrm{Re}(s)>0}\frac{\psi_+(s)}{s}=1;\quad \lim_{|s|\to\infty,\,\mathrm{Re}(s)<D}\frac{\psi_-(s)}{s}=-1. \quad (2)$$

В работе ставится задача нахождения решения для времени ожидания требований в очереди в СМО $HE_2/M/1$ и $HE_2^- / M^- / 1$. Для решения задачи необходимо вначале построить для указанных систем спектральные разложения вида $A^*(-s)\cdot B^*(s)-1=\psi_+(s)/\psi_-(s)$ с учетом условий (1), (2) в каждом случае.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли впервые подробно представлен в классике теории массового обслуживания [2], а впоследствии применялся во многих работах, включая [3,4]. Аналогичный подход к решению ИУЛ использован в [5]. Здесь вместо термина «спектральное разложение» использована факторизация, а вме-

© Тарасов В. Н., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-8

сто функций $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ – компоненты факторизации $\omega_+(z,t)$ и $\omega_-(z,t)$ функции $1-z\cdot\chi(t)$.

Такой подход для получения конечных результатов для рассматриваемых систем менее удобен, чем подход, описанный в [2] и проиллюстрированный многочисленными примерами.

В работе [6] автора впервые представлены результаты анализа СМО со сдвинутыми экспоненциальными распределениями.

Практическое применение метода спектрального разложения решения ИУЛ для исследования систем с гиперэкспоненциальными и экспоненциальными входными распределениями показано в работах [7–9]. В то же время, научной литературе, включая web-ресурсы, автору не удалось обнаружить результаты по времени ожидания для СМО с экспоненциальными и гиперэрланговскими входными распределениями 2-го порядка общего вида.

Аппроксимативные методы относительно законов распределений подробно описаны в работах [11–13], а похожие исследования в теории массового обслуживания в последнее время проведены в [14–17]

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для системы $HE_2/M/1$ законы распределения интервалов входного потока и времени обслуживания задаются функциями плотности вида:

$$a(t)=4p\lambda_1^2te^{-2\lambda_1t}+4(1-p)\lambda_2^2te^{-2\lambda_2t}, \quad (3)$$

$$b(t)=\mu e^{-\mu t}. \quad (4)$$

Решение для среднего времени ожидания для системы $HE_2/M/1$ будем строить на основе классического метода спектрального разложения решения ИУЛ, как это показано в [6–9]. Такой подход позволяет определить не только среднее время ожидания, но и моменты высших порядков времени ожидания. С учетом определения вариации задержки – джиттера в телекоммуникациях как разброс времени ожидания от его среднего значения [10], тем самым получим возможность определения джиттера через дисперсию времени ожидания.

Преобразования Лапласа функций (3) и (4) будут соответственно:

$$A^*(s)=p\left(\frac{2\lambda_1}{s+2\lambda_1}\right)^2+(1-p)\left(\frac{2\lambda_2}{s+2\lambda_2}\right)^2;\ B^*(s)=\frac{\mu}{s+\mu}.$$

Тогда спектральное разложение решения ИУЛ для системы $HE_2/M/1$ $A^*(-s)\cdot B^*(s)-1=\psi_+(s)/\psi_-(s)$ примет вид:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)}=\left[p\left(\frac{2\lambda_1}{2\lambda_1-s}\right)^2+(1-p)\left(\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2-s}\right)^2\right]\cdot\left(\frac{\mu}{\mu+s}\right)-1.$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках, представим в виде:

$$\left[p\left(\frac{2\lambda_1}{2\lambda_1-s}\right)^2+(1-p)\left(\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2-s}\right)^2\right]=$$
$$=\frac{p\left(16\lambda_1^2\lambda_2^2-16\lambda_1^2\lambda_2s+4\lambda_1^2s^2\right)}{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2}+$$
$$+\frac{(1-p)\left(16\lambda_1^2\lambda_2^2-16\lambda_1\lambda_2^2s+4\lambda_2^2s^2\right)}{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2}=$$
$$=\frac{a_0-a_1s+a_2s^2}{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2},$$

где промежуточные параметры $a_0=16\lambda_1^2\lambda_2^2$, $a_1=16\lambda_1\lambda_2[p\lambda_1+(1-p)\lambda_2]$, $a_2=4[p\lambda_1^2+(1-p)\lambda_2^2]$.

Продолжая разложение, получим:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)}=\frac{\mu(a_0-a_1s+a_2s^2)-(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2(\mu+s)}{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2(\mu+s)}=$$
$$=\frac{-s(s^4+c_3s^3+c_2s^2+c_1s+c_0)}{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2(\mu+s)}=$$
$$=\frac{-s(s+s_1)(s-s_2)(s-s_3)(s-s_4)}{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2(\mu+s)}.$$

Окончательно, спектральное разложение решения ИУЛ для системы $HE_2/M/1$ имеет вид:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)}=\frac{-s(s+s_1)(s-s_2)(s-s_3)(s-s_4)}{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2(\mu+s)}. \quad (5)$$

Многочлен четвертой степени в числителе разложения

$$s^4+c_3s^3+c_2s^2+c_1s+c_0 \quad (6)$$

с коэффициентами: $c_0=a_1\mu+16\lambda_1\lambda_2[\lambda_1\lambda_2-\mu(\lambda_1+\lambda_2)]$, $c_1=4\mu(\lambda_1^2+4\lambda_1\lambda_2+\lambda_2^2)-16\lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2)-a_2\mu$, $c_2=4(\lambda_1^2+\lambda_2^2)+16\lambda_1\lambda_2-4\mu(\lambda_1+\lambda_2)$, $c_3=\mu-4(\lambda_1+\lambda_2)$ имеет один действительный отрицательный корень и три положительных корня (либо вместо последних один действительный положительный и два комплексно сопряженных с положительной вещественной частью). Исследование знака младшего коэффициента c_0 показывает, что $c_0<0$ всегда в случае стабильной системы, когда $0<\rho<1$. Это также подтверждает предположение о наличии таких корней многочлена.

Далее, с учетом условий (1) и (2) строим рациональные функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$:

© Тарасов В. Н., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-8

$\psi_+(s) = s(s+s_1)/(\mu+s)$, т.к. нули многочлена (6): $s=0$, $s=-s_1$, и полюс $s=-\mu$ лежат в области $\mathrm{Re}(s)\le 0$, а за функцию $\psi_-(s) = -\frac{(2\lambda_1 - s)^2(2\lambda_2 - s)^2}{(s-s_2)(s-s_3)(s-s_4)}$, т. к. ее нули и полюсы лежат в области $\mathrm{Re}(s) < D$, определенной условием (1). Выполнение условий (1) и (2) спектрального разложения для построенных функций $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ очевидно, что также подтверждается рис. 1.

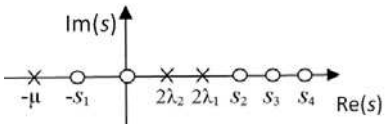


Рисунок 1 – Нули и полюсы функции $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ для системы $HE_2/M/1$

При построении этих функций удобнее нули и полюса отношения $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ отметить на комплексной s – плоскости для исключения ошибок построения функций $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$. На рисунке полюсы отмечены крестиками, а нули – кружками.

Далее по методике спектрального разложения найдем константу K:

$$K = \lim_{s\to 0}\frac{\psi_+(s)}{s} = \lim_{s\to 0}\frac{(s+s_1)}{(s+\mu)} = \frac{s_1}{\mu},$$

где s_1 – абсолютное значение отрицательного корня $-s_1$. Постоянная K определяет вероятность того, что поступающее в систему требование застает ее свободной.

Для нахождения преобразования Лапласа функции плотности времени ожидания построим функцию $\Phi_+(s) = \frac{K}{\psi_+(s)} = \frac{s_1(s+\mu)}{s\mu(s+s_1)}$.

Отсюда преобразование Лапласа функции плотности времени ожидания $W^*(s) = s\cdot\Phi_+(s)$ будет равно

$$W^*(s) = \frac{s_1(s+\mu)}{\mu(s+s_1)}. \qquad (7)$$

Для нахождения среднего времени ожидания найдем производную от функции $W^*(s)$ со знаком минус в точке $s = 0$:

$$\overline{W} = -\left.\frac{dW*(s)}{ds}\right|_{s=0} = \frac{-\mu s_1^2 + \mu^2 s_1}{\mu^2 s_1^2} = \frac{1}{s_1} - \frac{1}{\mu}.$$

Окончательно, среднее время ожидания для системы $HE_2/M/1$

$$\overline{W} = 1/s_1 - 1/\mu. \qquad (8)$$

Из выражения (7) также можно определить моменты высших порядков времени ожидания. Вторая производная от преобразования (7) в точке $s=0$ дает второй начальный момент времени ожидания, что позволяет определить дисперсию времени ожидания:

$$D_W = \frac{2}{s_1}\left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{\mu}\right).$$

Для практического применения выражения (8) необходимо определить числовые характеристики распределения (3) HE_2. Для распределения (4) эти характеристики известны из курса теории вероятностей. Для этого воспользуемся свойством преобразования Лапласа воспроизведения моментов и запишем начальные моменты до второго порядка для распределения (3):

$$\overline{\tau}_\lambda = \frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2}, \qquad (9)$$

$$\overline{\tau_\lambda^2} = \frac{3}{2}\left[\frac{p}{\lambda_1^2} + \frac{(1-p)}{\lambda_2^2}\right]. \qquad (10)$$

Рассматривая равенства (9) и (10) как запись метода моментов, найдем неизвестные параметры распределения (3) λ_1, λ_2, p. Система двух уравнений (9), (10) при этом является недоопределенной, поэтому к ней добавим выражение для квадрата коэффициента вариации:

$$c^2 = \frac{\overline{\tau_\lambda^2} - (\overline{\tau}_\lambda)^2}{(\overline{\tau}_\lambda)^2}, \qquad (11)$$

как связующее условие между (9) и (10). Кроме того, коэффициент вариации будем использовать в расчетах в качестве входного параметра системы. Исходя из вида уравнения (9) положим

$$\lambda_1 = 2p/\overline{\tau}_\lambda,\ \lambda_2 = 2(1-p)/\overline{\tau}_\lambda \qquad (12)$$

и потребуем выполнения условия (11). Подставив выражения (9), (10) и частное решение (12) в (11) и решив полученное уравнение четвертой степени относительно параметра p, выберем одно нужное значение с учетом условия $0 < p < 1$:

$$p = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{2(1+c_\lambda^2)-3}{8(1+c_\lambda^2)}}. \qquad (13)$$

Отсюда следует, что коэффициент вариации $c_\lambda > 1/\sqrt{2}$. Таким образом, получено частное решение не доопределенной системы уравнений (9) и (10) методом подбора.

© Тарасов В. Н., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-8

Такой же подход к аппроксимации законов распределения гиперэкспоненциальным распределением применен в работах автора [6–9]. Таким образом, гиперэрланговский закон распределения второго порядка может определяться полностью двумя первыми моментами и перекрывать весь диапазон изменения коэффициента вариации от $1/\sqrt{2}$ до ∞, что шире, чем у гиперэкспоненциального распределения $(1, \infty)$.

Величины $\bar{\tau}_\lambda$, $\bar{\tau}_\mu$, c_λ, c_μ будем считать входными параметрами для расчета среднего времени ожидания для системы $HE_2/M/1$. Тогда алгоритм расчета сведется к последовательному определению параметров распределения (3) из выражений (13), (12) и к нахождению нужного корня многочлена (6), а затем к использованию расчетного выражения (8).

Далее рассмотрим принципиально отличающуюся от исследованной СМО систему. Для системы $HE_2/M/1$ со сдвинутыми законами распределений интервалов входного потока и времени обслуживания эти законы задаются функциями плотности вида:

$$a(t) = 4p\lambda_1^2(t-t_0)e^{-2\lambda_1(t-t_0)} + 4(1-p)\lambda_2^2(t-t_0)e^{-2\lambda_2(t-t_0)}, \quad (14)$$

$$b(t) = \mu e^{-\mu(t-t_0)}. \quad (15)$$

Такую СМО в отличие от обычной системы обозначим как $HE_2^-/M^-/1$. В работе автора [6] система со сдвинутыми экспоненциальными входными распределениями обозначена как система с запаздыванием. Сдвиг во времени экспоненциального распределения трансформирует систему $HE_2/M/1$ типа G/M/1 в систему типа G/G/1.

Утверждение. Спектральные разложения решения ИУЛ $A^*(-s)\cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s)/\psi_-(s)$ для систем $HE_2^-/M^-/1$ и $HE_2/M/1$ полностью совпадают и имеют вид (5).

Доказательство. Преобразования Лапласа функций (14) и (15) будут соответственно:

$$A^*(s) = \left[p\left(\frac{2\lambda_1}{s+2\lambda_1}\right)^2 + (1-p)\left(\frac{2\lambda_2}{s+2\lambda_2}\right)^2 \right] \cdot e^{-t_0 s};$$

$$B^*(s) = \frac{\mu e^{-t_0 s}}{s+\mu}.$$

Спектральное разложение решения ИУЛ для системы $HE_2^-/M^-/1$ $A^*(-s)\cdot B^*(s) - 1 = \dfrac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)}$ примет вид:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \left[p\left(\frac{2\lambda_1}{2\lambda_1 - s}\right)^2 + (1-p)\left(\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2 - s}\right)^2 \right] e^{t_0 s} \times$$

$$\times \left(\frac{\mu}{\mu+s}\right) e^{-t_0 s} - 1 =$$

$$= \left[p\left(\frac{2\lambda_1}{2\lambda_1 - s}\right)^2 + (1-p)\left(\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2 - s}\right)^2 \right] \cdot \left(\frac{\mu}{\mu+s}\right) - 1.$$

Здесь экспоненты из-за противоположных знаков обнуляются и тем самым операция сдвига нивелируется. Следовательно, спектральные разложения для систем $HE_2^-/M^-/1$ и $HE_2/M/1$ полностью совпадают и имеют вид (5). Утверждение доказано.

Таким образом, по системе $HE_2^-/M^-/1$ мы полностью можем воспользоваться полученными выше результатами для системы $HE_2/M/1$, но с измененными числовыми характеристик сдвинутых распределений (14) и (15).

Определим числовые характеристики интервала между поступлениями требований и времени обслуживания для новой системы $HE_2^-/M^-/1$. Для этого воспользуемся преобразованием Лапласа функций (14) и (15).

Значение первой производной функции $A^*(s)$ со знаком минус в точке s=0 равно

$$-\left.\frac{dA^*(s)}{ds}\right|_{s=0} = p\lambda_1^{-1} + (1-p)\lambda_2^{-1} + t_0.$$

Отсюда среднее значение интервалов между соседними требованиями входного потока будет равно

$$\bar{\tau}_\lambda = p\lambda_1^{-1} + (1-p)\lambda_2^{-1} + t_0. \quad (16)$$

Значение второй производной функции $A^*(s)$ в точке s=0 дает второй начальный момент интервала поступления

$$\overline{\tau_\lambda^2} = t_0^2 + 2t_0\left[\frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2}\right] + \frac{3p}{2\lambda_1^2} + \frac{3(1-p)}{2\lambda_2^2}. \quad (17)$$

Отсюда определим квадрат коэффициента вариации интервалов поступления:

$$c_\lambda^2 = \frac{\lambda_1^2 - 2p\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2) + p(1-2p)(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2[\lambda_1 - p(\lambda_1 - \lambda_2) + t_0\lambda_1\lambda_2]^2}. \quad (18)$$

Для определения числовых характеристик распределения (4) воспользуемся результатами [1].

Среднее время обслуживания в системе $HE_2^-/M^-/1$ равно

$$\bar{\tau}_\mu = \mu^{-1} + t_0. \quad (19)$$

Второй начальный момент времени обслуживания равен

$$\overline{\tau_\mu^2} = t_0^2 + \frac{2t_0}{\mu} + \frac{2}{\mu^2}. \quad (20)$$

Отсюда коэффициент вариации времени обслуживания будет равен

$$c_\mu = (1 + \mu t_0)^{-1}. \quad (21)$$

© Тарасов В. Н., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-8

Заметим, что коэффициенты вариации $c_\lambda > 0$ и $c_\mu < 1$ при параметре сдвига $t_0 > 0$. Таким образом, очевидно, что система $HE_2^-/M^-/1$ относится к типу G/G/1.

Рассматривая выражения (16)–(21) как форму записи метода моментов, найдем неизвестные параметры распределения (14) и (15): $\lambda_1, \lambda_2, p, t_0, \mu$. Нахождение параметров распределения (14) λ_1, λ_2, p будет аналогичным нахождению этих параметров для распределения (3). Теперь исходя из вида уравнения (16) положим

$$\lambda_1 = 2p/(\overline{\tau}_\lambda - t_0),\ \lambda_2 = 2(1-p)/(\overline{\tau}_\lambda - t_0) \qquad (22)$$

и потребуем выполнения условия (18). Подставив частное решение (22) в (18) решаем полученное уравнение четвертой степени относительно параметра p с учетом условия $0 < p < 1$ и выберем нужное решение

$$p = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{3(\overline{\tau}_\lambda - t_0)^2}{8[(\overline{\tau}_\lambda - t_0)^2 + c_\lambda^2 \overline{\tau}_\lambda^2]}},$$

а затем определяем из (22) параметры λ_1 и λ_2.

Остается определить параметры распределения (15) из уравнений моментов (19)–(21). Из (19) получим значение $t_0 = \overline{\tau}_\mu - \mu^{-1}$ и подставив его в (21) найдем параметр распределения (15) $\mu = 1/c_\mu \overline{\tau}_\mu$. Тогда параметр сдвига будет связан с параметрами обслуживания условием

$$t_0 = \overline{\tau}_\mu (1 - c_\mu). \qquad (23)$$

Выражение (23) будет определять диапазон изменения параметра сдвига $t_0 \in (0, 1)$.

Задавая значения $\overline{\tau}_\lambda$, $\overline{\tau}_\mu$, c_λ, c_μ в качестве входных параметров системы, таким образом определяем известным методом моментов все неизвестные параметры распределений (14) и (15).

Теперь рассмотрим влияние параметра сдвига на коэффициенты вариаций распределений. Для обычного распределения HE_2, как следует из выражений (9)–(11), получим:

$$c_\lambda^2 = \frac{\lambda_1^2 - 2p\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2) + p(1-2p)(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2[\lambda_1 - p(\lambda_1 - \lambda_2)]^2}.$$

Сравнивая последнее выражение с (18) убеждаемся, что параметр сдвига во времени $t_0 > 0$ уменьшает коэффициент вариации интервалов поступлений в $1 + \frac{t_0 \lambda_1 \lambda_2}{[\lambda_1(1-p) + \lambda_2 p]}$ раз. Аналогично для экспоненциального закона времени обслуживания, параметр сдвига уменьшает коэффициент вариации времени обслуживания в $1 + \mu t_0$ раз. Учитывая квадратичную зависимость среднего времени ожидания от коэффициентов вариаций интервалов поступлений и времени обслуживания, убеждаемся в том, что введение параметра сдвига в законы распределения, уменьшает среднее время ожидания в очереди в СМО.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Ниже в табл. 1 приведены данные расчетов для системы $HE_2/M/1$ для случаев малой, средней и высокой нагрузки $\rho = 0{,}1;\ 0{,}5;\ 0{,}9$. Для сравнения в правой колонке приведены данные для системы $H_2/M/1$, для которой $c_\lambda \geq 1$ [1].

Таблица 1 – Результаты экспериментов для СМО $HE_2/M/1$ в сравнении с $H_2/M/1$

Входные параметры		Среднее время ожидания	
ρ	c_λ	для системы $HE_2/M/1$	для системы $H_2/M/1$
0,1	0,71	0,03	–
	2	0,08	0,19
	4	0,10	0,23
	8	0,11	0,25
0,5	0,71	0,62	–
	2	2,00	2,16
	4	4,62	4,83
	8	10,15	10,40
0,9	0,71	6,61	–
	2	22,59	22,41
	4	77,28	75,79
	8	295,96	289,13

Значения среднего времени ожидания в системах $HE_2/M/1$ и $H_2/M/1$ достаточно близки при средней и высокой нагрузке систем, хотя моменты распределений (начиная со второго) HE_2 и H_2 разнятся. Заметим, что системы $H_2/M/1$ справедлива только при $c_\lambda \geq 1$ и $c_\mu = 1$, потому в табл. 1 для $c_\lambda < 1$ стоят прочерки.

В табл. 2 приведены результаты экспериментов для системы $HE_2^-/M^-/1$, а для сравнения в правой колонке приведены данные для обычной системы $HE_2/M/1$.

Коэффициент загрузки ρ в обеих таблицах определяется отношением средних интервалов $\rho = \overline{\tau}_\mu / \overline{\tau}_\lambda$. Расчеты, приведенные в табл. 1–2 проведены для нормированного времени обслуживания $\overline{\tau}_\mu = 1$.

© Тарасов В. Н., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-8

Таблица 2 – Результаты экспериментов для СМО $HE_2^- / M^- / 1$ и $HE_2/M/1$

Входные параметры		Среднее время ожидания			
ρ	c_μ / c_λ	для системы $HE_2^- / M^- / 1$			для системы $HE_2/M/1$
		$c_\mu = 0{,}1$ (t_0=0,9)	$c_\mu = 0{,}5$ (t_0=0,5)	$c_\mu = 0{,}99$ (t_0=0,01)	
0,1	0,71	0,000	0,005	0,029	0,03
	2	0,000	0,013	0,078	0,08
	4	0,000	0,016	0,094	0,10
	8	0,000	0,017	0,099	0,11
0,5	0,71	0,005	0,181	0,610	0,62
	2	0,008	0,458	1,966	2,00
	4	0,009	0,599	4,503	4,62
	8	0,009	0,655	9,706	10,15
0,9	0,71	0,344	2,956	6,516	6,61
	2	0,805	16,002	22,465	22,59
	4	1,102	60,607	77,044	77,28
	8	1,260	238,99	295,29	295,96

Данные табл. 2 полностью подтверждают сделанные выше предположения о среднем времени ожидания в системе с запаздыванием. Кроме того, с уменьшением параметра сдвига t_0 среднее время ожидания в системе с запаздыванием стремится к значению этого времени в обычной системе, что дополнительно подтверждает адекватность полученных результатов.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе получены спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для двух систем $HE_2/M/1$ и $HE_2^- / M^- / 1$, с помощью которых выведены расчетные выражения для среднего времени ожидания в очереди для этих систем в замкнутой форме. Результаты расчетов сравниваются с результатами аналогичной системы $H_2/M/1$.

Диапазон изменения параметров у пары $HE_2/M/1$ и $HE_2^- / M^- / 1$ шире, чем у пары $H_2/M/1$ и $H_2^- / M^- / 1$, поэтому указанные системы с успехом могут быть применены в современной теории телетрафика.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов подтверждают тот факт, что введение параметра сдвига $t_0 > 0$ в законы распределения приводит к качественно новой системе массового обслуживания, обладающей преимуществами перед обычной системой. В первую очередь это расширение диапазона применимости новой системы. Кроме этого, система с запаздыванием обеспечивает меньшую задержку по сравнению с обычной системой.

ВЫВОДЫ

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что получены спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для рассматриваемых систем и с их помощью выведены расчетные выражения для среднего времени ожидания в очереди для этих систем в замкнутой форме. Эти выражения расширяют и дополняют известные формулы теории массового обслуживания для среднего времени ожидания для систем типа G/M/1 и G/G/1 с произвольными законами распределений входного потока и времени обслуживания.

Практическое значение работы заключается в том, что полученные результаты с успехом могут быть применены в современной теории телетрафика, где задержки пакетов входящего трафика играют первостепенную роль. Для этого необходимо знать числовые характеристики интервалов входящего трафика и времени обслуживания на уровне двух первых моментов, что не вызывает трудностей при использовании современных анализаторов трафика [8, 9].

Перспективы дальнейших исследований просматриваются в продолжении исследования систем типа G/M/1 и G/G/1 с другими общими входными распределениями и в расширении и дополнении формул для среднего времени ожидания.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов В. Н. Исследование систем массового обслуживания с гиперэкспоненциальными входными распределениями / В. Н. Тарасов // Проблемы передачи информации. – 2016. – № 1. – С. 16–26.
2. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. под редакцией В. И. Неймана / Л. Клейнрок. – М. : Машиностроение, 1979. – 432 с.
3. Brannstrom N. A Queueing Theory analysis of wireless radio systems / N. Brannstrom. – Appllied to HS-DSCH, Lulea university of technology, 2004. –79 p.
4. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods / W. Whitt // Operation Research. – 1982. – № 1. – P. 125–147.
5. Бочаров П. П. Теория массового обслуживания / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. – М. : Изд-во РУДН, 1995. – 529 с.
6. Тарасов В. Н. Анализ и расчет системы массового обслуживания с запаздыванием / В. Н. Тарасов, Н. Ф. Бахарева, И. А. Блатов // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 11. – С. 51–59.
7. Тарасов В. Н. Определение среднего времени ожидания требований в управляемой системе массового обслуживания $H_2/H_2/1$ / В. Н. Тарасов, И. В. Карташевский // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 3(57). – С. 92–96.
8. Анализ входящего трафика на уровне трех моментов распределений временных интервалов / [В. Н. Тарасов, Н. Ф. Бахарева, Г. А. Горелов, С. В. Малахов] // Информационные технологии. – 2014. – № 9. – С. 54–59.
9. Тарасов В. Н. Математическая модель трафика с тяжелохвостным распределением на основе системы массового обслуживания $H_2/M/1$ / В. Н. Тарасов, Н. Ф. Бахарева, Г. А. Горелов // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 36–41.
10. HTTPS://tools.ietf.org/html/rfc3393. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM) (дата обращения: 26.02.2016).
11. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals / A. Myskja // Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13. Elsevier Science Publishers. – 1991. – P. 683–688.

© Тарасов В. Н., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-8

12. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
13. Алиев Т. И. Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания / Т. И. Алиев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2(84). – С. 88–93.
14. Aras A. K. Many-server Gaussian limits for overloaded non-Markovian queues with customer abandonment / A. K. Aras, X. Chen & Y. Liu // Queueing Systems. – 2018. – Vol. 89, No. 1. – P. 81–125. DOI: https://doi.org/10.1007/s11134-018-9575-0
15. Jennings O. B. Comparisons of ticket and standard queues / O. B. Jennings & J. Pender // Queueing Systems. – 2016. – Vol. 84, No. 1. – P. 145–202. DOI: https://doi.org/10.1007/s11134-016-9493-y
16. Gromoll H. C. Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times / H. C. Gromoll, B. Terwilliger & B. Zwart // Queueing Systems. – 2018. – Vol. 89, No. 3. – P. 213–241. DOI: https://doi.org/10.1007/s11134-017-9560-z
17. Legros B. M/G/1 queue with event-dependent arrival rates / B. Legros // Queueing Systems. – 2018. – Vol. 89, No. 3. – P. 269–301. DOI: https://doi.org/10.1007 /s11134-017-9557-7

Received 25.09.2018.
Accepted 11.12.2018.

УДК 621.391.1: 621.395

Тарасов В. Н. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення та управління в технічних системах Поволзького державного університету телекомунікацій та інформатики, Росія.

АНАЛІЗ ДВОХ СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ $HE_2/M/1$ ЗІ ЗВИЧАЙНИМИ ТА ЗСУНУТИМИ ВХІДНИМИ РОЗПОДІЛАМИ

АНОТАЦІЯ

Актуальність. В теорії масового обслуговування дослідження систем G/M/1 і G/G/1 актуальні у зв'язку з тим, що на сьогодні не існує рішення в кінцевому вигляді для загального випадку при довільних законах розподілів вхідного потоку і часу обслуговування. Розглянуто задачу виведення рішення для середнього часу очікування в черзі в замкнутій формі для двох систем зі звичайними і зі зсунутими гіперерлангівськими та експонентними вхідними розподілами.

Мета роботи. Отримання рішення для основної характеристики системи – середнього часу очікування вимог в черзі для двох систем масового обслуговування типу G/M/1 і G/G/1 зі звичайними та зі зсунутими гіперерлангівськими та експонентними вхідними розподілами.

Метод. Для вирішення поставленого завдання використано класичний метод спектрального розкладання розв'язку інтегрального рівняння Ліндлі. Цей метод дозволяє отримати розв'язок для середнього часу очікування для розглянутих систем в замкнутій формі. Метод спектрального розкладання розв'язку інтегрального рівняння Ліндлі грає важливу роль в теорії систем G/G/1. Для практичного застосування отриманих результатів було використано відомий метод моментів теорії ймовірностей.

Результати. Вперше отримано спектральні розкладання рішення інтегрального рівняння Ліндлі для двох систем, за допомогою яких виведені розрахункові формули для середнього часу очікування в черзі в замкнутій формі.

Висновки. Отримано спектральні розкладання розв'язку інтегрального рівняння Ліндлі для розглянутих систем, та з їх допомогою виведені розрахункові формули для середнього часу очікування в черзі для цих систем в замкнутій формі. Ці формули розширюють і доповнюють відомі формули теорії масового обслуговування для середнього часу очікування для систем G/M/1 і G/G/1 з довільними законами розподілів вхідного потоку і часу обслуговування. Такий підхід дозволяє розрахувати середній час очікування для зазначених систем в математичних пакетах для широкого діапазону зміни параметрів трафіку. Всі інші характеристики систем є похідними часу очікування.

Крім середнього часу очікування, такий підхід дає можливість також визначити моменти вищих порядків часу очікування. З огляду на той факт, що варіація затримки пакетів (джиттер) в телекомунікації визначається як дисперсія часу очікування від його середнього значення, то джиттер можна буде визначити через дисперсію часу очікування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: гіперерлангівський та експонентний закони розподілу, інтегральне рівняння Ліндлі, метод спектрального розкладання, перетворення Лапласа.

UDC 621.391.1:621.395

THE ANALYSIS OF TWO QUEUING SYSTEMS $HE_2/M/1$ WITH ORDINARY AND SHIFTED INPUT DISTRIBUTIONS

Tarasov V. N. – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Software and Management in Technical Systems of Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation.

ABSTRACT

Context. In queuing theory, G/M/1 and G/G/1 systems research is relevant in that there is still no solution in the final form for the general case for arbitrary laws of distributions of the input flow and service time. The problem of finding a solution for the average waiting time in queue in a closed form for two systems with ordinary and shifted hypererlangian and exponential input distributions is considered.

Objective. Obtaining a solution for the main system characteristic – the average waiting time in queue for two queuing systems of type G/M/1 and G/G/1 with ordinary and shifted hypererlangian and exponential input distributions.

Method. To solve this problem, we used the classical method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation. This method allows to obtaining a solution for the average waiting time for systems under consideration in a closed form. The method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation plays an important role in the theory of systems G/G/1. For the practical application of the results obtained, the well-known method of moments of probability theory is used.

© Тарасов В. Н., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-8

Results. The spectral decompositions of the solution of the Lindley integral equation for a pair of dual systems are for the first time received, with the help of which the formulas for the average waiting time in a closed form are derived.

Conclusions. The spectral expansions of the solution of the Lindley integral equation for the systems under consideration are obtained and with their help the formulas for the average waiting time in the queue for these systems in a closed form are derived. These expressions expand and supplement the known queuing theory formulas for the average waiting time for G/M/1 and G/G/1 systems with arbitrary laws distributions of input flow and service time. This approach allows us to calculate the average latency for these systems in mathematical packages for a wide range of traffic parameters. All other characteristics of the systems are derived from the waiting time. In addition to the average waiting time, such an approach makes it possible to determine also moments of higher orders of waiting time. Given the fact that the packet delay variation (jitter) in telecommunications is defined as the spread of the waiting time from its average value, the jitter can be determined through the variance of the waiting time.

KEYWORDS: hypererlangian and exponential distribution laws, Lindley integral equation, spectral decomposition method, Laplace transform.

REFERENCES

1. Tarasov V. N. Analysis of queues with hyperexponential arrival distributions, *Problems of Information Transmission,* 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 14–23. DOI:10.1134/S0032946016010038
2. Kleinrock L. Teoriya massovogo obsluzhivaniya. Moscow, Mashinostroeinie Publ, 1979, 432 p.
3. Brannstrom N.A. Queueing Theory analysis of wireless radio systems. Appllied to HS-DSCH. Lulea university of technology, 2004, 79 p.
4. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods, *Operation Research,* 1982, Vol. 30, No. 1, pp. 125–147.
5. Bocharov P. P., Pechinkin A. V. Teoriya massovogo obsluzhivaniya. Moscow, Publishing House of Peoples' Friendship University, 1995, 529 p.
6. Tarasov V. N., Bakhareva N. F., Blatov I. A. Analysis and calculation of queuing system with delay, *Automation and Remote Control,* 2015, No. 11, pp. 1945–1951. DOI: 10.1134/S0005117915110041
7. Tarasov V. N., Kartashevskiy I. V. Opredelenie srednego vremeni ozhidaniya trebovaniy v upravliaemoi sisteme massovogo obsluzhiavaniya $H_2/H_2/1$*, Sistemy upravleniya i informatsionniye tehnologii,* 2014, No. 3, pp. 92–95.
8. Tarasov V. N., Bahareva N. F., Gorelov G. A., Malakhov S. V. Analiz vhodiaschego trafika na urovne treh momentov raspredeleniy. Informacionnye technologii, 2014, No. 9, pp. 54–59.
9. Tarasov V. N., Bakhareva N. F., Gorelov G. A. Matematicheskaya model trafika s tiazhelohvoctnymi raspredeleniyami na osnove sistemy massovogo obsluzhivaniya $H_2/M/1$, *Infokommunikacionnye technologii,* 2014, No. 3, pp. 36–41.
10. RFC 3393 [IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)] Available at: https://tools.ietf.org/html/rfc3393. (accessed: 26.02.2016).
11. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals. Teletraffic and datatraffic in a Period of Change. ITC-13. Elsevier Science Publishers, 1991, pp. 683–688.
12. Aliev T. I. Osnovy modelirovaniya diskretnyh system. SPb:, SPbGU ITMO, 2009, 363 p.
13. Aliev T. I. Approksimaciya veroyatnostnyh raspredelenij v modelyah massovogo obsluzhivaniya, *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki,* 2013, Vol. 84, No. 2, pp. 88–93.
14. Aras A.K., Chen X. & Liu Y. Many-server Gaussian limits for overloaded non-Markovian queues with customer abandonment, *Queueing Systems,* 2018, Vol. 89, No. 1, pp. 81–125. DOI: https://doi.org/10.1007/s11134-018-9575-0
15. Jennings O. B. & Pender J. Comparisons of ticket and standard queues, *Queueing Systems,* 2016, Vol. 84, No. 1, pp. 145–202. DOI: https://doi.org/10.1007/s11134-016-9493-y
16. Gromoll H. C., Terwilliger B. & Zwart B. Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times. Queueing Systems, 2018, Vol. 89, No. 3, pp. 213–241. DOI: https://doi.org/10.1007/s11134-017-9560-z
17. Legros B. M/G/1 queue with event-dependent arrival rates, *Queueing Systems,* 2018, Vol. 89, No. 3, pp. 269–301. DOI: https://doi.org/10.1007 /s11134-017-9557-7

© Тарасов В. Н., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-8

UDC 004.942:519.216.3

A COMBINED APPROACH TO MODELING NONSTATIONARY HETEROSCEDASTIC PROCESSES

Tymoshchuk O. L. – PhD, Associate Professor at the Department of Mathematical Methods of System Analysis, Institute for Applied Systems Analysis at the NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kiev, Ukraine.

Huskova V. H. – Post-graduate student at the Department of Mathematical Methods of System Analysis, Institute for Applied Systems Analysis at the NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kiev, Ukraine.

Bidyuk P. I. – Dr. Sc., Professor at the Department of Mathematical Methods of System Analysis, Institute for Applied Systems Analysis at the NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kiev, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Nonlinear nonstationary processes are observed today in various fields of studies: economy, finances, ecology, demography etc. Very often special approaches are required for model development and forecasts estimation for the processes mentioned. The modeling methodologies have to take into consideration possible uncertainties that are encountered during data processing and model structure and parameter estimation.

Objective. To develop a modified methodology for constructing models for nonlinear processes that allows for achieving high quality of forecasts. More specifically heteroscedastic processes are considered that create a wide class of nonlinear nonstationary processes and are considered in many areas of research.

Method. To reach the aim of the study mentioned the following methods are used: systemic approach to model building and forecasting, modified methodology for modeling nonlinear processes, methods for identification and taking into consideration possible uncertainties. To cope with the structural uncertainties following techniques: refinement of model order applying recurrent adaptive approach to modeling and automatic search for the "best" structure using complex statistical criteria; adaptive estimation of input delay time, and the type of data distribution with its parameters; describing detected nonlinearities with alternative analytical forms with subsequent estimation of the forecasts generated.

Results. The proposed modified methodology for modeling nonlinear nonstationary processes, adaptation scheme for model building, new model structures proposed. As a result of performing computational experiments, it was found that nonlinear models constructed provide a possibility for computing high quality forecasts for the process under study and their variance.

Conclusions. Application of the modeling methodology proposed provides a possibility for structural and parametric adaptation of the models constructed with statistical data. The models developed exhibit acceptable adequacy and quality of short-term forecasting.

KEYWORDS: nonlinear nonstationary processes, systemic approach to modeling, structural and parametric adaptation, combined models, uncertainties in modeling and forecasting.

ABBREVIATIONS

ACF is an autocorrelation function;

AIC is an Akaike information criterion;

AR is an autoregression;

ARCH is an autoregressive conditional heteroscedasticity;

ARMA is an autoregression with moving average;

DW is a Durbin-Watson statistic;

EGARCH is an exponential generalized autoregression with conditional heteroscedasticity;

GARCH is a generalized autoregressive conditionally heteroscedastic;

GMDH is a group method of data handling method;

GNP is a gross national product;

HSP is a heteroscedastic processes;

IDA is an intellectual data analysis;

KF is a Kalman filter;

MAE is a mean absolute error;

MAPE is a mean absolute percentage error;

MCMC is a Markov chain Monte Carlo;

ML is a maximum likelihood;

MLNSVM is a modified log-normal model of stochastic volatility;

NLS is a nonlinear least squares;

NNP is a nonlinear nonstationary processes;

SS is a state space;

U is a Theil coefficient.

NOMENCLATURE

$h(k)$ is a conditional variance;

$y_1(k)$ is a gross national product logarithm;

$y_2(k)$ is a logarithm of tax deductions;

$\bar{y}$ is a sample mean for the data window w selected for computing conditional variance;

$\mathbf{x}(k)$ is a vector of state variables;

$x_1(k)$ is a level of internal investment;

$x_2(k)$ is a level of external investment;

$\mathbf{z}(k)$ is a vector of time delayed values of dependent variable $y(k)$;

$z_i(k),\ i = 1,2,...,m$ is an explaining variables for $x(k)$;

α_i, γ_i is a model parameters to be estimated with maximum likelihood or Monte Carlo Markov chain procedures;

$\varphi_i(x)$ is a set of linear and nonlinear functions;

$\varepsilon(k)$ is a random process that influences financial process under study;

$\hat{\varepsilon}^2(k)$ is an account effects of absolute values.

© Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-9

INTRODUCTION

The study is focused on combined models development for forecasting nonlinear nonstationary heteroscedastic processes in economy, finances, ecology and other areas. Most of the processes taking place in these areas belong to the class of nonlinear and nonstationary due to many random factors influencing their evolution in time. Financial processes are influenced by various random shocks happening inside of countries (local inflation, high competition between companies, unstable market situations) where they are originated and by outside shocks in the form of general economic crisis, fast variability of prices on energy resources, raw materials and food etc. Processes in modern ecology and climatology also often exhibit unstable nonstationary development with nonlinearities. Thus, the problem of constructing forecasting models for the process mentioned is urgent and it is considered by many researchers [1–4].

A simplified classification of NNP in economy, finances, demography, ecology, is shown in Fig. 1. The figure provides information for a general situation in the area of study.

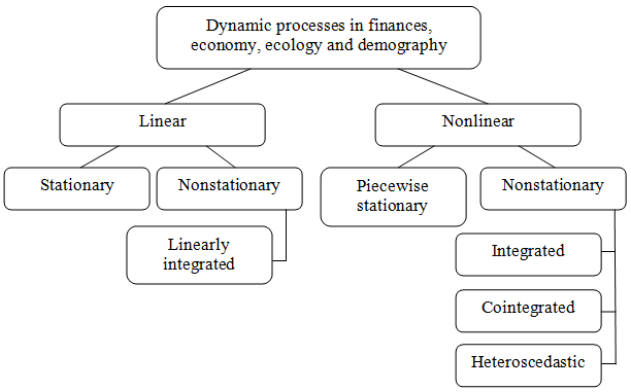


Figure 1 – A simplified classification of dynamic processes

The object of study is the linear process can be nonstationary only in a case when it contains linear trend. Nonlinear processes can be piecewise stationary mostly in their stable mode of operation. NNP are most commonly met in many areas of study. They include nonlinear integrated process with trends of order two and higher, cointegrated processes with the same degree of integration, and heteroscedastic processes. The latter suggest simultaneous constructing of the following two model types: first model describing evolution of the process (amplitude) itself, and the second model describing dynamics of conditional variance that is widely used in practice for solving the problems of diagnostics (technical, medical, financial and economic), risk analysis in various spheres including, stock trading, investments etc. The article is concentrated on the studying of nonlinear nonstationary processes with time varying variance and mean on the interval of study.

The subject of study is the known mathematical models and construct the new ones using statistical data. An approach to modeling the processes mentioned is proposed providing a possibility for constructing the models of acceptable adequacy.

The purpose of the work is in development of methodology and system for constructing mathematical models of nonlinear nonstationary (heteroscedastic) processes of acceptable adequacy and providing a possibility for computing high quality of forecasts. Special software was developed on the purpose and illustrative examples are given.

1 PROBLEM STATEMENT

The purpose of the study is as follows: (1) development of some generalized methodology for modeling and forecasting nonlinear non-stationary heteroscedastic processes both for the process itself and its conditional variance; (2) development of combined model based upon linear and nonlinear regression; (3) performing of computational experiments directed towards model constructing for NNP and computing short term forecasts for the process amplitudes and their conditional variances; (4) performing a comparative analysis of the results achieved with various models constructed with the computational experiments.

The formal problem statement is as follows: statistical data are given characterizing nonlinear nonstationary processes with arbitrary probabilistic distribution $\{y(k)\} \sim Dist(\mu(k), \sigma_y^2(k))$, $k = 1,...,N$, where $\mu(k) \neq \text{const}$ is time varying mean; $\sigma_y^2(k) \neq \text{const}$ is process variance that is varying on the interval of the process study. The statistical data parameters are subject to the following restrictions: $\mu(k) < \infty$; $0 < \sigma_y^2(k) < \infty$ on the interval of studying. It is necessary to construct mathematical models for the process mentioned of the general structure: $y(k) = F[y(k), x(k), \theta, \varepsilon(k)]$, where $x(k)$ is possible independent variable; θ is model vector parameters; $\varepsilon(k)$ is stochastic process induced by external disturbances and measurement errors. The constructed model selection criteria are based upon determination coefficient, R^2, DW, MAPE, Theil coefficient, U, and combined criterion: $J = \left|1 - R^2\right| + \left|2 - DW\right| + U \to \min\limits_{\hat{\theta}}$. The models will be constructed according to the methodology proposed.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

A comprehensive study of nonlinear nonstationary HSP is given in [5]. Here methodology of modeling and forecasting HSP using ARCH models is provided based on statistical data. Several parameter estimation methods are considered including maximum likelihood. A set of model misspecification tests is provided and fractionally

© Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-9

integrated models are analyzed. The volatility forecasting problem is considered with one-step-ahead and multistep forecasting using actual statistical data and known computer based systems for time series analysis.

A comparative study of VaR estimation methods for structured products is considered in [6]. The author studies forecast accuracy of GARCH and EGARCH models by means of multivariate extension of the Diebold and Mariano [7] test proposed for non-nested models. It was shown that GARCH and EGARCH models often produce higher capital requirements than ARCH models in order to avoid default risks.

The article is concentrated on the problem of modeling and forecasting heteroscedastic processes using systemic approach to solving the problems. Some special software was developed for identification and taking into consideration possible uncertainties relevant to statistical data processing.

Thus, among possible data uncertainties are the following: missing measurements, random external influences (state noise), short low informative samples, possible outliers, noise corrupted measurements etc. These uncertainties are relatively easy identifiable and easy to correct with available data processing techniques for the lost measurements imputation, bootstrap analysis and filtering techniques. The model structure uncertainties aforementioned are provoked by poor data structure that does not contain enough information for model the structure and parameter estimation.

The parametric uncertainties are closely related to the quality of available data and their influence is usually related to biased parameter estimates and low model adequacy. The remedy for avoiding the bias is in application of alternative parameter estimation techniques, among which are the following: maximum likelihood and MCMC procedures. A substantial improvement of forecasts estimates can be reached with simultaneous hiring of alternative forecasting methods and forecasts combining techniques [8–12].

3 MATERIALS AND METHODS

Fig. 2 illustrates the scheme of the generalized approach proposed that is suitable for modeling both linear and nonlinear processes as well as financial risk estimation.

First exponential smoothing, optimal Kalman or elliptical filtering is applied to input data to perform smoothing and prepare the data to model constructing procedures. After smoothing the model can be linear or nonlinear dependently on the specific effects contained in the input data. Generally data may contain linear and nonlinear part what will result in linear and nonlinear models (or components of a single model) simultaneously. In a case of heteroscedastic processes analysis usually the following problems are solved: (1) constructing a model that describes formally the process itself; (2) constructing a model describing dynamics of conditional variance; (3) estimation of short-term forecasts using both types of models.

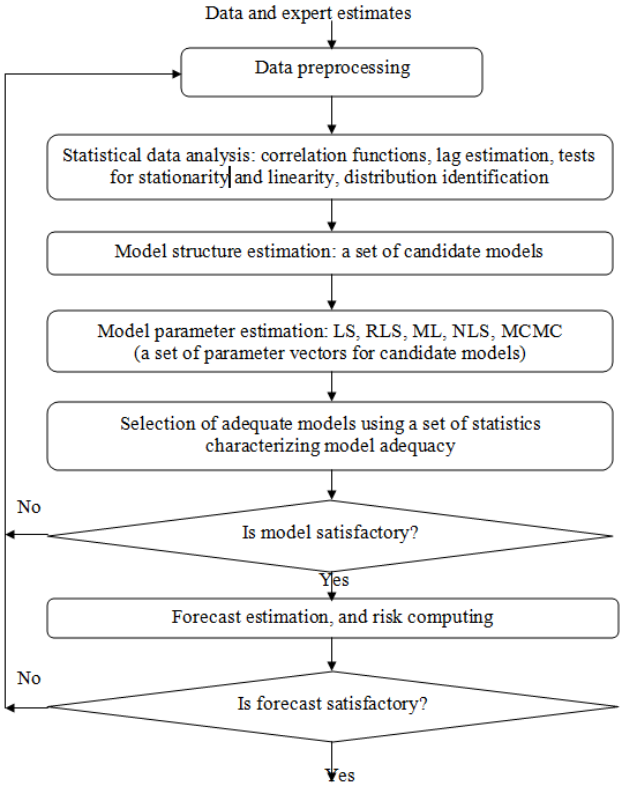


Figure 2 – An approach to modeling heteroscedastic processes and financial risk estimation

The methodology proposed for modeling nonlinear nonstationary processes includes the steps formulated below.

– Data pre-processing before modeling that includes the following operations: imputation of missing observations, measurements normalization, digital and/or optimal filtering, statistical processing of outliers etc.

– Identification and elimination (or decreasing of influence) of data uncertainties using the following data processing procedures: estimation of non-measurable values, estimation of statistical parameters for observations (variance, covariance, mean, median), appropriate data structuring, analysis of random external influences and their distributions, coping with measurement errors, taking into consideration probabilistic uncertainties etc.

– Model structure estimation using statistical (correlation) and probabilistic (mutual information) data analysis techniques providing a possibility for determining the following elements of a model structure: model dimension (number of equations); model order (order of autoregression and moving average parts); nonlinearity and its type (nonlinearity with respect to variables or with respect to parameters); delay time estimate, and type of probabilistic distribution for the variables under study; it is always desirable to estimate structures for several candidate models to get a possibility for further selection of the best one.

– Taking into consideration possible nonlinearities. It is recommended to construct first nonlinear part of a data model using various possibilities for describing nonlinear parts: polynomials, exponents, squared harmonic func-

© Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-9

tions, bilinear constructions etc. Then linear part of the model is fitted using nonlinear model residuals. Good results were achieved with combining linear and nonlinear regression; linear regression and Bayesian networks; linear regression and special nonlinear functions like non-parametric kernels etc.

– Model parameters estimation using alternative methods such as NLS, ML, MCMC procedures and others providing unbiased estimates of parameters under specific distributions of variables and model structures. Application of alternative parameter estimation techniques provides a possibility for further comparison of the estimates and selection of the best ones after comparison of the models constructed.

– Computing statistical parameters characterizing candidate models adequacy and determining the most suitable (adequate) one(s) among them. It is not necessarily to leave only one model for computing forecasts, it can be a set of the "best" models based on different ideologies. The final choice is always made after model application for solving the following specific problems: forecasting, control, constructing simulation model or deep analysis of the process under study.

Computing model based forecasts for the process (under study) evolution and their quality estimation for the final selection of the best forecasting model. Here another set of statistical quality criteria is used: MAPE, Theil coefficient, mean absolute error, minimum and maximum forecasting errors etc. On the purpose of automatized model selection the following combined criteria is proposed:

$$J = \left|1 - R^2\right| + \left|2 - DW\right| + U \to \min_{\hat{\theta}}.$$

– Testing the model(s) constructed on similar processes (model calibration).

To timely and reliably monitor the methodology implementation it is necessary to utilize in modeling system at least three sets of statistical quality parameters: data quality parameters, model adequacy and forecasts quality statistics. Also the quality criteria selected/developed should analyze alternative decisions based on the forecasts generated. Correct practical application of the methodology proposed is an important task aiming constructing adequate models suitable for solving the problems of forecasting, automatic (or semi-automatic) control, financial risk estimation, business decision making, complex system simulation etc.

Today there exist some known methodologies for studying linear and nonlinear nonstationary processes, and constructing adequate mathematical models in the aforementioned fields (including financial processes) using statistical procedures for regression analysis and SS representation [8, 9, 12]. Another popular approach to development linear and NNP models is based on IDA techniques: artificial neural networks, fuzzy sets, neuro-fuzzy models, static and dynamic Bayesian networks, complex multivariate distributions, non-parametric models, decision trees etc.

When constructing linear and nonlinear time series models it is convenient to use the proposed here unified notion of mathematical model structure:

$$S = \left\{ r,\ p,\ m,\ n,\ d,\ w,\ l \right\} \tag{1}$$

where r is model dimension (number of equations); p is model order (maximum order of differential or difference equation used for process description); m is a number of independent variables; n is nonlinearity and its type (with respect to variables or parameters); d is input delay time; w is external stochastic disturbance and its type of distribution; l represents possible restrictions on variables and parameter values. The aforementioned elements of a model structure are estimated using available statistical tests and correlation analysis techniques: correlation matrix, ACF, partial ACF, bi-correlations, and higher order correlation functions.

Some nonlinear models that were utilized successfully in practice resulted from former studying of econometric time series. Nonlinear regression of the type shown below is used to describe GNP and tax deductions [10]:

$$y_1(k) = a_0 + a_1 y_1(k-1) + b_{12} \exp(y_2(k)) + \\ + a_2 x_1(k) x_2(k) + \varepsilon_1(k). \tag{2}$$

$$y_2(k) = c_0 + c_1 y_2(k-1) + b_{21} \exp(y_1(k)) + \\ + c_2 x_1(k) x_2(k) + \varepsilon_2(k). \tag{3}$$

Also widely used and convenient model structure is generalized bilinear model:

$$y(k) = a_0 + \sum_{i=1}^{p} a_i\, y(k-i) + \sum_{j=1}^{q} b_j\, v(k-j) + \\ + \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{s} c_{i,j}\, y(k-i) v(k-j) + \varepsilon(k), \tag{4}$$

where p, q, m and S are positive numbers that represent the model order [8].

Very often modeling nonlinear processes is based on linear combination of linear and nonlinear components:

$$y(k) = \beta^T \mathbf{z}(k) + \sum_{i=1}^{p} \alpha_i\ \varphi_i(\theta_i^T\, \mathbf{z}(k)) + \varepsilon(k), \tag{5}$$

where $\mathbf{z}(k)$ is a vector of time delayed values of dependent variable $y(k)$, as well as former and current values of independent explaining variables $\mathbf{x}(k)$ with appropriate time shift. Here $\varphi_i(x)$ is a set of (linear and nonlinear) functions that include the following components: power function $\varphi_i(x) \equiv x^i$; trigonometric functions $\varphi_i(x) = \sin x$ or $\varphi_i(x) = \cos x$ etc.; this equation can be

© Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-9

expanded with quadratic form of the type $\mathbf{z}^T(k)\,\mathbf{A}\,\mathbf{z}(k)$; $\varphi_i(x) = \varphi(x),\ \forall i$, where $\varphi(x)$ is a link function, for example appropriate probability density function or logistic function of the type:

$$\varphi(x(k,z)) = \frac{1}{1+\exp(-x(k,z))}. \qquad (6)$$

$$x(k) = \alpha_0 + \alpha_1 z_1(k) + ... + \alpha_m z_m(k) + \varepsilon(k), \qquad (7)$$

where $z_i(k), i = 1,2,...,m$ are explaining variables for $x(k)$, and $\varphi(x(k,z))$ respectively.

Another general class of nonlinear models can be presented in the following form:

$$\mathbf{y}(k) = \sum_{j=1}^{p} \varphi_j(\mathbf{x}(k-1))\,\mathbf{y}(k-j) + \\ + \mu(\mathbf{x}(k-1)) + \varepsilon(k), \qquad (8)$$

where $\mathbf{y}(k)$ is $[n \times 1]$ a vector of dependent variables; $\mathbf{x}(k) = [\mathbf{y}(k), \mathbf{y}(k-1),..., \mathbf{y}(k-n+1)]$ is a vector of state variables; dynamics of the variables is described by the model:

$$\mathbf{x}(k) = h(\mathbf{x}(k-1)) + \mathbf{F}(\mathbf{x}(k-1))\,\mathbf{x}(k-1) + v(k). \qquad (9)$$

The model based forecasts can be computed, for example, with six selected (or more) techniques given in fig. 3. Regression model (autoregression or with moving average) is used for generating forecast as well as its transformed version into SS form for further use by optimal KF. Adaptive version of KF provides a possibility for forecasting and on-line (off-line) estimation of state disturbances and measurement noise covariance. The GMDH generates models in the general form of Kolmogorov-Gabor polynomial, and the last three methods are related to the intellectual data analysis techniques. Thus, here we have the combination of classic regression (statistical) approach with intellectual data analysis techniques. The best result of combining the forecasts is achieved when variances of forecasting errors for selected forecasting techniques do not differ substantially. Some other possibilities for hiring nonlinear models for formal description of NNP are shown in table 1. Most of them have been used successfully for modeling and forecasting economic and financial processes.

The models (No. 1–8) presented in Table 1 have known structure though it can be modified in the process of adaptation using specific statistical data. Model 1 was successfully applied for trend modeling of various orders together with short-term deviations from conditional mean. Models 2, 4 can describe bilinear and exponential nonlinearities or nonlinearity with saturation (model 3). Models 5 and 6 are used for description of conditional variance dynamics while modeling heteroscedastic process. The last one turned out to be the best model for short term forecasting of variance

Table 1 – Some linear and nonlinear models for describing process dynamics

№	Model description Formal model structure
1	AR + polynomial of time $y(k) = a_0 + \sum_{i=1}^{p} a_i\, y(k-i) + b_1 k + ... + b_m k^m + \varepsilon(k)$ $k = 0,1,2,...$ is discrete time; $t = kT_s$; T_s is sampling time.
2	Generalized bilinear model $y(k) = a_0 + \sum_{i=1}^{p} a_i\, y(k-i) + \sum_{j=1}^{q} b_j\, v(k-i) =$ $= \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{s} c_{ij}\, y(k-i)\, v(k-j) + \varepsilon(k)$
3	Logistic regression $\varphi(x(k,z)) = \frac{1}{1+\exp(-x(k,z))}$, $x(k) = \alpha_0 + \alpha_1 z_1(k) + ... + \alpha_m z_m(k) + \varepsilon(k)$
4	Nonlinear extended econometric autoregression $y_1(k) = a_0 + a_1 y_1(k-1) + b_{12} \exp(y_2(k)) +$ $+ a_2 x_1 x_2 + \varepsilon_1(k), y_2(k) = c_0 + c_1 y_2(k-1) +$ $+ b_{21} \exp(y_1(k)) + c_2 x_1 x_2 + \varepsilon_2(k)$
5	Generalized autoreg-ression with conditional heteroscedasticity $h(k) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{q} \alpha_i \varepsilon^2(k-i) + \sum_{i=1}^{p} \beta_i h(k-i)$.
6	Exponential genera-lized autoregression with conditional heteroscedasticity $\log[h(k)] = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{p} \alpha_i \frac{\lvert\varepsilon(k-i)\rvert}{\sqrt{h(k-i)}} +$ $+ \sum_{i=1}^{p} \beta_i \frac{\varepsilon(k-i)}{\sqrt{h(k-i)}} + \sum_{i=1}^{q} \gamma_i \log[h(k-i)] + v(k)$
7	Nonparametric model with functional coefficients $y(k) = \sum_{i=1}^{p} \{\alpha_i + (\beta_i + \gamma_i\, y(k-d)) \cdot$ $\exp(-\theta_i y^m(k-d))\} + \varepsilon(k)$
8	Radial basis function $f_\theta(x(k)) = \sum_{i=1}^{M} \lambda_i \exp\left(-\frac{(x(k)-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) + \varepsilon(k),$ $\theta = [\mu_i, \sigma_i, \lambda_i]^T;\ M = 2,3,...$
9	State-space representation $\mathbf{x}(k) = \mathbf{F}[\mathbf{a}(k), \mathbf{x}(k-1)] + \mathbf{B}[\mathbf{b}(k), \mathbf{u}(k-d)] + \mathbf{w}(k)$
10	Neural networks – Selected (constructed) network structure
11	Fuzzy sets and neuro-fuzzy models – Combination of fuzzy variables and neural network model
12	Dynamic Bayesian networks – Probabilistic Bayesian network structure constructed with data and/or expert estimates
13	Multivariate distributions – Like copula application for describing multivariate distribution
14	Immune systems – Immune algorithms and combined models

in about 90% of applications performed by the authors. Models 7, 8, 9 can describe arbitrary nonlinearities with respect to variables of order 3–5 or higher. Fuzzy sets based approach to modeling supposes generating of a set of

© Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-9

rules that could describe with acceptable quality functioning of selected processes and formulate appropriate logical inference. Neural networks and fuzzy neural networks are suitable for modeling sophisticated nonlinear functions in conditions of availability of some unobservable variables. Dynamic Bayesian networks and multivariate distributions are statistical/probabilistic models that could describe complex multivariate processes (systems) with generating final result of their application in the form of conditional probabilities (probabilistic inference).

The model based forecasts for nonstationary process itself can be computed, for example, with six selected (or more) techniques given in Fig. 3. Regression model (autoregression or with moving average) is used for generating forecast as well as its transformed version into SS form for further use by optimal Kalman filter. Adaptive version of KF provides a possibility for forecasting and on-line (off-line) estimation of state disturbances and measurement noise covariance. The GMDH generates models in the general form of Kolmogorov-Gabor polynomial, and the last three methods are related to the intellectual data analysis techniques. Thus, here we have the combination of classic regression (statistical) approach with intellectual data analysis techniques. The best result of combining the forecasts is achieved when variances of forecasting errors for selected forecasting techniques do not differ substantially. Some other possibilities for hiring linear and nonlinear models are shown in table 1.

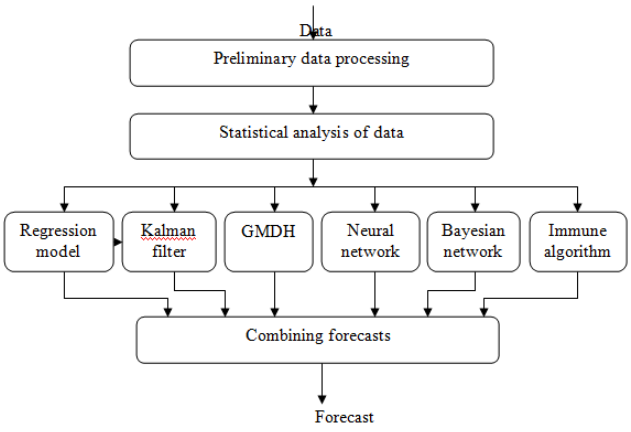


Figure 3 – Illustration of the combining principle for alternative forecasts

Models of conditional variance. Today there exist a wide variety of models describing dynamic of conditional variance. Here we will mention only those that were tested during experimental studies using statistical data.

We propose modified log-normal model of stochastic volatility in the following form:

$$\begin{aligned} y(k) &= e^{\frac{h(k)}{2}}\varepsilon(k), \quad \varepsilon(k) \sim N(0,1), \quad k = 1, \ldots, N \\ h(k) &= \alpha + \beta_1 h(k-1) + \ldots + \beta_p h(k-p) + \\ &+ \gamma_1 y(k) + \gamma_2 \hat{\varepsilon}^2(k-q) + \eta(k), \quad \eta(k) \sim N\left(0, \sigma_\eta^2\right). \end{aligned} \tag{10}$$

where $h(k) = \frac{1}{w} \sum_{l=k-\frac{w-1}{2}}^{k+\frac{w-1}{2}} [y(l) - \bar{y}]^2$ is conditional variance that characterizes dynamics of the financial time series under study. The model proposed also takes into consideration necessary depth of memory for the process formed by the values of conditional variance $h(k)$, as well as the values of basic variable $y(k)$, that provides a possibility for taking into consideration influence of positive and negative disturbances to conditional variance. The performed testing of the model proved the possibility of its practical application for forecasting conditional volatility and financial risk estimation.

One of the best results so far with forecasting the variance was achieved with exponential generalized autoregression with conditional heteroscedasticity (EGARCH) shown below [2]:

$$\begin{aligned} \log[h(k)] &= \alpha_0 + \sum_{i=1}^{p} \alpha_i \frac{|\varepsilon(k-i)|}{\sqrt{h(k-i)}} + \\ &+ \sum_{i=1}^{p} \beta_i \frac{\varepsilon(k-i)}{\sqrt{h(k-i)}} + \sum_{i=1}^{q} \gamma_i \log[h(k-i)] + \upsilon(k) \end{aligned}, \tag{11}$$

where $h(k)$ is conditional variance; $\varepsilon(k)$ is random process that influences financial process under study; α_i, γ_i are model parameters to be estimated with maximum likelihood or MCMC procedures; $\upsilon(k)$ are model residuals.

4 EXPERIMENTS

The analysis included three experiments. In the first experiment time series was applied for studying of the gold prices within the period between 2005–2006 years. The statistical characteristics showing constructed models and forecasts quality are given in Table 2. Here the case is considered when optimal KF was not used for preliminary data processing smoothing.

The second experiment was statistical analysis of the time series selected with application of Goldfeld-Quandt test proved that gold prices data create heteroscedastic process with time varying conditional variance. As far as the variance is one of the key parameters that is used in the rules for performing trading operations it is necessary to construct appropriate forecasting models. Table 4 contains statistical characteristics of the models constructed as well as quality of short-term forecasting. To solve the problem we used GARCH models together with description of the processes trend which is rather sophisticated (high order process). The models of this type GARCH demonstrated low quality of short-term forecasts, and quite acceptable EGARCH one-step ahead forecasting properties.

Forecasting financial process (stock prices) using combined (linear + nonlinear) model – third experiment. The combined model includes optimal and digital filters, linear regression models and nonlinear logit model (Fig. 4).

© Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-9

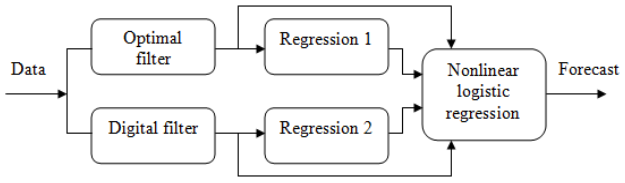


Figure 4 – Combined model: filtering + linear regression + nonlinear regression

The purpose of using the filters is to perform data smoothing (suppressing high frequency components) and this way prepare it for modeling. Besides, application of optimal KF additionally provides a possibility for solving the following problems: estimation of non-measurable state vector components; variance (covariance) estimation for observations and the state vector; and short-term forecasting in a case of necessity.

The data used reflect dynamics of stock prices together with technical analysis indicators. The indicators computed on the basis of actual dynamics of prices create useful data for modeling and forecasting financial processes. Among widely used indicators are the following: Pivot Point, Woodie's Pivot Points, Fibonacci's Pivot Points, Camarilla's Pivot Points.

5 RESULTS

Experiment 1 shown that the best model turned out to be AR(1) + trend of 4th order. It provides a possibility for one step ahead forecasting with mean absolute percentage error of about 3.19%, and Theil coefficient is $U = 0.024$.

Table 2 – Models and forecasts quality without Kalman filter application

Model type	Model quality			Forecast quality			
	R^2	$\sum e^2(k)$	DW	MS	MAE	MAPE	Theil
AR(1)	0.99	25644.67	2.15	49.82	41.356	8.37	0.046
AR(1,4)	0.99	25588.10	2.18	49.14	40.355	8.12	0.046
AR(1) + 1st order trend	0.99	25391.39	2.13	34.39	25.109	4.55	0.032
AP(1,4) +1st order trend	0.99	25332.93	2.18	34.51	25.623	4.67	0.032
AR(1) + 4th order trend	0.99	25173.74	2.12	25.92	17.686	3.19	0.024

The Theil coefficient shows that this model is generally good for short-term forecasting. Statistical characteristics of the models and respective forecasts computed with KF application for data smoothing are given in table 3. Here optimal filter (with random walk model) played positive role what is supported by respective statistical quality parameters.

Again the best model turned out to be AR(1) + trend of 4th order. It provides a possibility for one step ahead forecasting with mean absolute percentage error of about 2.71%, and Theil coefficient is: $U = 0.019$. Thus, in this case the results achieved are better than in previous modeling and short-term forecasting without filter application.

Table 3 – Models and forecasts quality with application of Kalman filter

Model type	Model quality			Forecast quality			
	R^2	$\sum e^2(k)$	DW	MSE	MAE	MAPE	Theil
AR(1)	0.99	24376.32	2.11	45.21	39.73	7.58	0.037
AR(1.4)	0.99	24141.17	2.09	47.29	38.75	7.06	0.035
AR(1) + 1st order trend	0.99	23964.73	2.08	31.15	22.11	3.27	0.029
AR(1) + 4th order trend	0.99	22396.83	2.04	21.35	13.52	2.71	0.019

Experiment 2. Statistical analysis of the time series selected with application of Goldfeld-Quandt test proved that gold prices data create heteroscedastic process with time varying conditional variance. As far as the variance is one of the key parameters that is used in the rules for performing trading operations it is necessary to construct appropriate forecasting models. Table 4 contains statistical characteristics of the models constructed as well as quality of short-term variance forecasting. To solve the problem we GARCH models together with description of the processes trend which is rather sophisticated (high order process). The models of this type GARCH demonstrated low quality of short-term forecasts, and quite acceptable EGARCH one-step ahead forecasting properties.

Table 4 – Results of modeling and forecasting conditional variance

Model type	Model quality			Forecast quality			
	R^2	$\sum e^2(k)$	DW	MSE	MAE	MAPE	Theil
GARCH (1,7)	0.99	153639	0.113	972.5	–	517.6	0.113
GARCH (1,10)	0.99	102139	0.174	458.7	–	211.3	0.081
GARCH (1,15)	0.99	80419	0.337	418.3	–	121.6	0.058
MLNSVM (3, 7)	0.99	61377	0.405	79.5	–	9.97	0.027
EGARCH (1, 7)	0.99	45184	0.429	67.8	–	8.74	0.023

Thus, the best model constructed was exponential GARCH(1,7). The achieved value of MAPE = 8.74% comprises very good result for forecasting conditional variance. The second was the model proposed MLNMSV that has two order parameters: p and q, with MAPE = 9.97%. Further improvements of the forecasts were achieved with application of the adaption scheme [1, 7]. An average improvement of the forecasts was in the range between 0.5–1.5%, what justifies advantages of the approach proposed. Combination of the forecasts generated with different forecasting techniques helped to further decrease mean absolute percentage forecasting error for about 0.5 – 0.8% in this particular case. It should be stressed that analysis of heteroscedastic processes is very popular today due to multiple engineering, economic and financial applications of the models and forecasts based upon them. The methodology developed also supposes constructing of combined models including classical statistical regression and probabilistic models in the form of Bayesian networks.

© Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-9

Experiment 3. The following notations were used for the indicators: Pivot is "turning point"; S1 is first level of support; S2 is second level of support; S3 is third level of support; R1, R2 and R3 are first, second and third levels of resistance. All three indicators work in a similar way. If open price is higher than, Pivot, and the price starts moving down, then from of view of technical analysis it is probable that after reaching Pivot value, the price will go up. In the case when this did not happen and the price continues moving down then, from the point of view of technical analysis, it is probable that the price may perform a turn or stop moving down when it approaches the level of, S1. The same situation takes place for S2 and, S3. However, price reaches the level of S3 very seldom. Even when the price gets down lower than, S3, then probability of its next moving down is very low. The same situation takes place in the case of a price moving up but here instead of indicators S1, S2, S3 should be used R1, R2, R3.

To construct regression models first were used minimum daily exchange rate for the pair USD/CHF (257 values for 2007). The first multiple regression model was constructed for minimum price with independent variables, S1, S2, $S3$:

$$y(k) = -0.0164 + 0.1724 \cdot S1(k) - 5.3885 \cdot S2(k) + \\ + 4.2251 \cdot S3(k), \quad (12)$$

where k is discrete time as before. This model does not include autoregression part because this variant results in degeneration of measurement matrix. The model constructed has the following statistical characteristics of adquacy: $R^2 = 0.9899$; $SSR = 0.0038$; $AIC = -8.277$; $DW = 1.9542$ All statistics exhibit quite acceptable values. Statistical characteristics that characterize quality of one-step-ahead prediction are as follows: $RMSE$ = 0.0038; MAE = 0.003; $MAPE$ = 0.2525%; U = 0.0016. Number of correct forecasts for direction of price evolution was 187 or 73.05%.

As far as evolution of stock prices very often takes place along arbitrary nonlinear trajectories, to describe correctly the processes it is necessary to use nonlinear models. In some cases rather simple approach to solving the problem is application of nonlinear logistic regression. It can be helpful for forecasting direction of a price moving during the next step of its evolution. If at the moment of time $t+1$ price will be higher than at the moment, t, denote this situation (price growth) as "1", and price decreasing denote as "0". These values were used as inputs (for left-hand-side) of logistic regression and classification tree. The same notation was used for growth and decreasing of the *Pivot Point* indicator with the following additional notations for respective variables: $\hat{S}1$, $\hat{S}2$, $\hat{S}3$, $\hat{P}$, $\hat{R}1$, $\hat{R}2$, $\hat{R}3$. These variables were used as independent ones in logistic regression and classification tree. The following model was constructed for the minimum price:

$$g_{\min}(x_2) = \frac{e^{x_2(k)}}{1+e^{x_2(k)}}, \quad (13)$$

$$x_2(k) = -0.683 + 0.033 \cdot \hat{S}1(k) + 0.055 \cdot \hat{S}2(k) + \\ + 0.055 \cdot \hat{S}3(k) - 0.4 \cdot \hat{P}(k) + 1.627 \cdot \hat{R}1(k) + \\ + 0.133 \cdot \hat{R}2(k) + 0.264 \cdot \hat{R}3(k), \quad (14)$$

$$g_{\max 2}(x_1) = \frac{e^{x_1(k)}}{1+e^{x_1(k)}}, \quad (15)$$

$$x_1(k) = -0.871 + 0.127 \cdot \hat{S}1(k) + 0.404 \cdot \hat{S}2(k) - \\ - 0.36 \cdot \hat{S}3(k) - 0.247 \cdot \hat{P}(k) + +0.616 \cdot \hat{R}1(k) + \\ + 0.079 \cdot \hat{R}2(k) - 0.009 \cdot \hat{R}3(k) + 2.159 \cdot \hat{y}(k). \quad (16)$$

Results of forecasting direction for evolution of minimum price are presented in Table 5.

Table 5 – Results of forecasting direction for evolution of minimum price

Model type	Probability of correct direction forecast
Linear regression with indicators	73.05%
Logistic regression with Pivot Point	68.36%
Classification tree with Pivot Point	68.36%
Logistic regression with Pivot Point + forecast by linear model	75.03%
Classification tree with Pivot Point + forecast by linear model	73.83%
Logistic regression with Woodie's Pivot Point	68.75%
Classification tree with Woodie's Pivot Point	68.36%
Logistic regression with Woodie's Pivot Point + forecast by linear model	75.39%
Classification tree with Woodie's Pivot Point + forecast by linear model	73.83%
Logistic regression with Fibonacci's Pivot Point	65.23%
Classification tree with Fibonacci's Pivot Point	65.23%
Logistic regression with Fibonacci's Pivot Point + forecast by linear model	74.22%
Classification tree with Fibonacci's Pivot Point + forecast by linear model	73.83%

Thus, in both cases (logistic regression and classification tree) the best results were achieved with the use of additional forecast achieved by the linear model. The statistical quality characteristics of the forecasts achieved show high quality of the forecasts and possibility of their use in trading rules.

6 DISCUSSION

Based on table 5 we got the following results: for the threshold value of probability 0.44 the first type error accepted the value of about 53, and second type error was 28. The number of correctly forecasted directions for price evolution was 175 or 68.36%. The use of the classification tree (CHAID algorithm) with threshold value 0.35 practically led to the same result.

To improve quality of the forecasts the models of logistic regression and classification tree were augmented with forecasts of price evolution generated by linear regression using the same notation for the growth and decreasing, where linear regression output that accepts the value of "1" if forecast shows growth of the price, and "0"

© Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-9

if forecast shows decreasing of the price. For the threshold value of probability 0.39 the first type error accepted the value of about 39, and second type error was 25. The number of correctly forecasted directions for price evolution was 192 or 75.0%. When classification tree was used for the threshold value of probability 0.32 the first type error accepted the value of about 54, and second type error was 13. The number of correctly forecasted directions for price evolution was 189 or 73.83%.

CONCLUSIONS

In this article we proposed an approach for obtaining high-quality results of the adequacy of the final model was obtained to describe formally linear and nonlinear parts of a process under study using the software developed on the purpose.

The scientific novelty of obtained results is that the original definition of model structure was given and a short review of mathematical models for nonlinear nonstationary processes was presented. Several application examples were provided that exhibit high quality of final results namely model adequacy and quality of the forecasts. A methodology was proposed for mathematical modeling and forecasting nonlinear nonstationary in economy and finances using statistical data, though the methodology is applicable to constructing models in demography, ecology as well as in many other spheres of human activity where data is available in the time series form. The methodology is based on general system analysis principles that suppose hierarchical structure of data analysis procedure, identification and processing of possible uncertainties. The systemic approach to modeling also supposes development and implementation of adaptive schemes for model structure and parameter estimation, application of statistical, probabilistic and other criteria for model constructing procedure, and to selection of the best model for specific application.

The practical significance of obtained results is that the performed tracking the computational procedures at all stages of data processing and model development with appropriate sets of quality statistics provides a possibility for achieving high quality of intermediate and final results. As instrumentation for fighting possible uncertainties the following techniques were used: optimal filtering procedures, missing data imputation techniques, multiple methods for model parameter estimation, and Bayesian programming approach, decision trees etc.

Prospects for further research will be focused on refinement of the methodology proposed namely model structure and parameter estimation procedures, development of new model structures for NNP and active use of ideologically different approaches to modeling and forecasting in the frames of one modeling and forecasting system.

REFERENCES

1. Bidyuk P., Prosyankina-Zharova T., Terentiev O. Modeling nonlinear nonstationary processes in economy and finances, *Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer)*, 2018, Vol. 754, pp. 735–745. DOI: 10.1007/978-3-319-91008-6_72
2. De Gooijer J. G. Elements of nonlinear time series analysis and forecasting. Cham (Switzerland): Springer, 2017, 618 p. DOI: 10.1007/978-3-319-43252-6
3. Tsay R. S. Analysis of financial time series. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2010, 715 p. DOI: 10.2307/4128199
4. Cheng Ch., Sa-Ngasoongsong, Beyka O .F. et al. Time series forecasting for nonlinear and nonstationary process: a review and comparative study, *IIE Transactions,* 2016, Vol. 47, pp. 1053–1071. DOI: 10.1080/0740817X.2014.999180
5. Xekalaki E., Degiannakis S. ARCH models for financial applications. Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 2010, 520 p. DOI: 10.1002/9780470688014
6. Chen F. Y. A Comparative study of VaR estimation for structured products, *Economics Research International*, 2010, Article ID 838469, pp. 1–16. DOI: 10.1155/2010/838469
7. Diebold F. X., Mariano R. S. Comparing predicting, *Journal of Business and Economic Statistics*, 1995, Vol. 13, pp. 253–263. DOI: 10.1080/07350015.1995.10524599
8. Diebold F.X. Elements of forecasting. Ohio, Thomson South-Western, 2007, 458 p. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2008.05.004
9. Bidyuk P. I., Trofymchuk O.M., Kozhukhivska O. A. Probabilistic and statistical uncertainty processing using decision support systems, *Visnyk of Lviv Polytechnic National University*, 2015, No. 826, pp. 237–248.
10. Diebold F.X. Forecasting in economics, business, finance and beyond. Pennsylvania, University of Pennsylvania, 2015, 607 p.
11. Hansen B.E. Econometrics. University of Wisconsin, 2017, 427 p. DOI: 10.1080/00220485.2017.1320610
12. Bidyuk P. I., Dovgij S. O., Trofymchuk O. M. DSS based on statistical and probabilistic procedures. Kyiv, Logos, 2014, 420 p.

Received 13.12.2018.
Accepted 27.02.2019.

УДК 004.942: 519.216.3

КОМБІНОВАНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ГЕТЕРОСКЕДАСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Тимощук О. Л. – канд. техн. наук, доцент кафедри математичних методів системного аналізу, Інститут прикладного системного аналізу, НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського », Київ, Україна.

Гуськова В. Г. – аспірант кафедри математичних методів системного аналізу, Інститут прикладного системного аналізу, НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського », Київ, Україна.

Бідюк П. І. – д-р техн. наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу, Інститут прикладного системного аналізу, НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського », Київ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Нелінійні нестаціонарні процеси сьогодні спостерігаються в різних областях досліджень: економіка, фінанси, екологія, демографія і т. д. Дуже часто для розробки моделей і прогнозів згаданих процесів потрібні спеціальні підходи. Методології моделювання повинні враховувати можливі невизначеності, що виникають при обробці даних, структурі моделі і оцінки параметрів.

Мета роботи. Розробити модифіковану методологію побудови моделей нелінійних процесів, яка дозволяє досягти високої якості прогнозів. Більш конкретно розглянуті гетероскедастичні процеси, які створюють широкий клас нелінійних нестаціонарних процесів і розглядаються в багатьох областях досліджень.

Метод. Для досягнення мети згаданого дослідження використовуються наступні методи: системний підхід до побудови моделей і прогнозування, модифікована методологія моделювання нелінійних процесів, методи ідентифікації та врахування можливих невизначеностей. Для подолання структурних невизначеностей використовуються методи: уточнення порядку моделей з викорис-

© Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-9

танням періодичного адаптивного підходу до моделювання і автоматичний пошук «найкращої» структури з використанням складних статистичних критеріїв; адаптивна оцінка часу затримки введення і типу розподілу даних з їх параметрами; опис виявлених нелінейностей за допомогою альтернативних аналітичних форм з подальшою оцінкою отриманих прогнозів.

Результати. Запропоновано модифіковану методологію моделювання нелінійних нестаціонарних процесів, схему адаптації для побудови моделей, запропоновані нові модельні структури. В результаті виконання обчислювальних експериментів було виявлено, що побудовані нелінійні моделі дають можливість обчислювати прогнози високої якості для досліджуваного процесу та їх дисперсії.

Висновки. Застосування запропонованої методології моделювання дає можливість структурної та параметричної адаптації моделей, побудованих за статистичними даними. Розроблені моделі демонструють прийнятну адекватність і якість короткострокового прогнозування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: нелінійні нестаціонарні процеси, системний підхід до моделювання, структурна і параметрична адаптація, комбіновані моделі, невизначеність в моделюванні та прогнозуванні.

УДК 004.942: 519.216.3

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГЕТЕРОСКЕДАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Тимощук О.Л. – канд. техн. наук, доцент кафедры математических методов системного анализа, Институт прикладного системного анализа, НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина.

Гуськова В. Г. – аспирант кафедры математических методов системного анализа, Институт прикладного системного анализа, НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина.

Бидюк П.И. – д-р техн. наук, профессор кафедры математических методов системного анализа, Институт прикладного системного анализа, НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Нелинейные нестационарные процессы наблюдаются сегодня в различных областях исследований: экономика, финансы, экология, демография и т. д. Очень часто для разработки моделей и прогнозов упомянутых процессов требуются специальные подходы. Методологии моделирования должны учитывать возможные неопределенности, возникающие при обработке данных, структуре модели и оценке параметров.

Цель работы. Разработать модифицированную методологию построения моделей нелинейных процессов, которая позволяет достичь высокого качества прогнозов. Более конкретно рассмотрены гетероскедастичные процессы, которые создают широкий класс нелинейных нестационарных процессов и рассматриваются во многих областях исследований.

Метод. Для достижения цели упомянутого исследования используются следующие методы: системный подход к построению моделей и прогнозированию, модифицированная методология моделирования нелинейных процессов, методы идентификации и учет возможных неопределенностей. Для преодоления структурных неопределенностей используются методы: уточнение порядка моделей с использованием периодического адаптивного подхода к моделированию и автоматический поиск «наилучшей» структуры с использованием сложных статистических критериев; адаптивная оценка времени задержки ввода и типа распределения данных с их параметрами; описание обнаруженных нелинейностей с помощью альтернативных аналитических форм с последующей оценкой полученных прогнозов.

Результаты. Предложена модифицированная методология моделирования нелинейных нестационарных процессов, схема адаптации для построения моделей, предложены новые модельные структуры. В результате выполнения вычислительных экспериментов было обнаружено, что построенные нелинейные модели дают возможность вычислять прогнозы высокого качества для исследуемого процесса и их дисперсии.

Выводы. Применение предложенной методологии моделирования дает возможность структурной и параметрической адаптации моделей, построенных со статистическими данными. Разработанные модели демонстрируют приемлемую адекватность и качество краткосрочного прогнозирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нелинейные нестационарные процессы, системный подход к моделированию, структурная и параметрическая адаптация, комбинированные модели, неопределенности в моделировании и прогнозировании.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Modeling nonlinear nonstationary processes in economy and finances / [P. Bidyuk, T. Prosyankina-Zharova, O. Terentiev] // Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer). – 2018. – Vol. 754. – P. 735–745. DOI: 10.1007/978-3-319-91008-6_72
2. De Gooijer J. G. Elements of nonlinear time series analysis and forecasting / J. G. De Gooijer. – Cham (Switzerland): Springer, 2017. – 618 p. DOI: 10.1007/978-3-319-43252-6
3. Tsay R.S. Analysis of financial time series / R. S. Tsay. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2010. – 715 p. DOI: 10.2307/4128199
4. Time series forecasting for nonlinear and nonstationary process: a review and comparative study / [Ch. Cheng, Sa-Ngasoongsong, O. F. Beyka et al.] // IIE Transactions. – 2016. – Vol. 47. – P. 1053–1071. DOI: 10.1080/0740817X.2014.999180
5. Xekalaki E. ARCH models for financial applications / E. Xekalaki, S. Degiannakis. – Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2010. – 520 p. DOI: 10.1002/9780470688014
6. Chen F. Y. A Comparative study of VaR estimation for structured products / F. Y. Chen // Economics Research International. – 2010, Article ID 838469. – P. 1–16. DOI: 10.1155/2010/838469
7. Diebold F. X. Comparing predicting accuracy / F. X. Diebold, R.S. Mariano // Journal of Business and Economic Statistics. – 1995. – Vol. 13. – P. 253 – 263. DOI: 10.1080/07350015.1995.10524599
8. Diebold F. X. Elements of forecasting / F. X. Diebold. – Ohio: Thomson South-Western, 2007. – 458 p. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2008.05.004
9. Bidyuk P. I. Probabilistic and statistical uncertainty processing using decision support systems / P. I. Bidyuk, O. M. Trofymchuk, O. A. Kozhukhivska // Visnyk of Lviv Polytechnic National University. – 2015. – No. 826. – P. 237–248.
10. Diebold F. X. Forecasting in economics, business, finance and beyond / F. X. Diebold. – Pennsylvania : University of Pennsylvania, 2015. – 607 p.
11. Hansen B. E. Econometrics / B. E. Hansen. – University of Wisconsin, 2017. – 427 p. DOI: 10.1080/00220485.2017.1320610
12. Bidyuk P. I. DSS based on statistical and probabilistic procedures / P. I. Bidyuk, S. O. Dovgij, O. M. Trofymchuk. – Kyiv : Logos, 2014. – 420 p.

© Tymoshchuk O. L., Huskova V. H., Bidyuk P. I., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-9

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

UDC 004.93

OPTIMIZATION METHOD BASED ON THE SYNTHESIS OF CLONAL SELECTION AND ANNEALING SIMULATION ALGORITHMS

Grygor O. O. – PhD, Associate Professor, Rector of the Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine.

Fedorov E. E. – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Robotics and Specialized Computer Systems, Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine.

Utkina T. Yu. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Robotics and Specialized Computer Systems, Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine.

Lukashenko A. G. – PhD, Senior Researcher of the E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine.

Rudakov K. S. – PhD, Senior Lecturer of the Department of Robotics and Specialized Computer Systems, Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine.

Harder D. A. – Junior Researcher of the E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine.

Lukashenko V. M. – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Robotics and Specialized Computer Systems, Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of increasing the efficiency of optimization methods by synthesizing metaheuristics is considered. The object of the research is the process of finding a solution to optimization problems.

Objective. The goal of the work is to increase the efficiency of searching for a quasi-optimal solution at the expense of a metaheuristic method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms.

Method. The proposed optimization method improves the clonal selection algorithm by dynamically changing based on the annealing simulation algorithm of the mutation step, the mutation probability, the number of potential solutions to be replaced. This reduces the risk of hitting the local optimum through extensive exploration of the search space at the initial iterations and guarantees convergence due to the focus of the search at the final iterations. The proposed optimization method makes it possible to find a conditional minimum through a dynamic penalty function, the value of which increases with increasing iteration number. The proposed optimization method admits non-binary potential solutions in the mutation operator by using the standard normal distribution instead of the uniform distribution.

Results. The proposed optimization method was programmatically implemented using the CUDA parallel processing technology and studied for the problem of finding the conditional minimum of a function, the optimal separation problem of a discrete set, the traveling salesman problem, the backpack problem on their corresponding problem-oriented databases. The results obtained allowed to investigate the dependence of the parameter values on the probability of mutation.

Conclusions. The conducted experiments have confirmed the performance of the proposed method and allow us to recommend it for use in practice in solving optimization problems. Prospects for further research are to create intelligent parallel and distributed computer systems for general and special purposes, which use the proposed method for problems of numerical and combinatorial optimization, machine learning and pattern recognition, forecast.

KEYWORDS: metaheuristics, clonal selection, annealing simulation, optimization, technology of information parallel processing.

ABBREVIATIONS

CLONALG is a clonal selection algorithm;
SA is an algorithm for simulating annealing;
MSE is a mean square error;
CUDA is the compute unified device architecture.

NOMENCLATURE

A^{mt} is the mutation operator;
A^{cl} is the cloning operator;
A^{rd} is the reduction operator;
A^{rp} is the replacement operator;

© Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-10

x is a solution (antibody);

x^* is a (quasi) optimal solution (antibody);

$F(\cdot)$ is the fitness function;

$f(\cdot)$ is the function for which the conditional minimum should be found;

$F_w(\cdot)$ is the penalty function;

$\Phi(\cdot)$ is an affinity;

$X^{(n)}$ is a population at iteration n;

μ is population and intermediate population power;

C is a set of antibody clones;

q is a number of clones for each antibody;

$\hat{C}$ is a set of mutated antibodies clones;

λ is a power of the set mutated clones;

M is the intermediate population;

α is the cloning parameter;

$p(\cdot)$ is the mutation probability;

$round()$ is the function, rounding the number to the nearest integer;

$U(0,1)$ is the function that returns a uniformly distributed random number in the range $[0,1]$;

$N(0,1)$ is the function that returns a standard normally distributed random number;

d is a number of replaced antibodies;

$d^{\max}$ is the maximum number of replaced antibodies;

n is an iteration number;

$n^{\max}$ is the maximum number of iterations;

$x_i^{\min}$, $x_i^{\max}$ are the minimum and maximum values of the i^{th} component of the antibody respectively;

Δ_i is a mutation step for the i^{th} component of the clone;

δ is the mutation parameter, $0 < \delta < 1$;

$T(n)$ is the annealing temperature at iteration n;

T_0 is an initial annealing temperature;

β is a cooling ratio;

$h_z(\cdot)$ is the z^{th} equality constraint;

$g_z(\cdot)$ is the z^{th} inequality constraint;

Z_1 is a number of equality constraints;

Z_2 is a number of inequality constraints;

X_w is the subset of the current population containing antibodies that satisfy all constraints;

I_1 is a number of arguments of the function for which the conditional minimum should be found;

S is the partitionable set;

s_k is a vector, one-to-one corresponding to the k^{th} element of the partitionable set;

J is a number of features of the element partitionable set;

K is the power of the partitionable set;

I_2 is a number of classes into the partitionable set;

d_{x_i,x_j} is the distance between points of the route x_i, x_j;

I_3 is a number of points of the route;

W is a load capacity;

w_i is a weight of i^{th} cargo;

v_i is a value of the i^{th} cargo;

I_4 is a number of cargo.

INTRODUCTION

Today, the development of methods aimed at solving problems of numerical and combinatorial optimization, machine learning, etc., which are used in general and special-purpose intelligent computer systems, is an urgent task.

Existing optimization methods that find the exact solution have high computational complexity. Optimization and machine learning methods that find an approximate solution through directional search have a high probability of falling into a local extremum. Random search methods do not guarantee convergence. In this connection, the problem of insufficient efficiency of optimization methods, which needs to be solved, arises.

The object of study is the process of finding solutions to optimization problems.

The subject of study is the methods for finding a quasi-optimal solution based on metaheuristics.

The purpose of the work is to increase the efficiency of searching for a quasi-optimal solution at the expense of a metaheuristic method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

1) to create a quasi-optimal method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms;

2) to adapt the proposed method to the problem of finding the conditional minimum of functions;

3) to adapt the proposed method to the problem of optimal partitioning of a discrete set;

4) to adapt the proposed method to the traveling salesman problem;

5) to adapt the proposed method to the knapsack problem;

6) to conduct a numerical study of the proposed optimization method.

1 PROBLEM STATEMENT

The problem of increasing the efficiency of searching a solution to an optimization problem based on clonal selection is represented as the problem of finding such an ordered set of operators $\{A^{mt}, A^{cl}, A^{rd}, A^{rp}\}$, the iterative application of which provides finding such a solution x^* in which $F(x^*) \to \min$ and $T \to \min$, moreover, the solution structure x, fitness function $F(\cdot)$ and mutation operator A^{mt} depend on the problem to be

© Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-10

solved, and the structures of the cloning A^{cl}, reduction A^{rd} and replacement A^{rp} operators are independent.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

To accelerate a quasi-optimal solution of optimization and machine learning problems and reduce the likelihood of falling into a local extremum, metaheuristics (or advanced heuristics) are used [1–5]. Metaheuristics expands the capabilities of heuristics by combining heuristic methods based on a high-level strategy [6–10].

However, modern metaheuristics have one or more of the following disadvantages:

– there is only an abstract description of the method or the description of the method is focused on solving only a specific task [1];

– the influence of the iteration number on the solution search process [2] is not taken into account;

– the convergence of the method [11] is not guaranteed;

– there is no possibility of using non-binary potential solutions [12];

– the procedure for determining the values of parameters [13] is not automated;

– there is no possibility to solve the problems of conditional optimization [14];

– insufficient accuracy of the method [15].

Therefore, the efficiency of the method for the search of quasi-optimal solution is of paramount importance.

The clonal selection algorithm, proposed by Castro and von Zuben [16–17], developed in [18–21] and programmatically implemented in [22], is one of the popular metaheuristics.

3 MATERIALS AND METHODS

The optimization method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms is developed.

The sequence of procedures of the proposed optimization method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms is shown in Fig. 1.

In block 1, an initial population $X^{(1)} = \{x\}$ with power μ is created, and each antibody of this population corresponds to a potential solution of the problem.

In block 2, the current annealing temperature at iteration n is calculated

$$T(n) = \beta^n T_0,\ T_0 > 0,\ 0 < \beta < 1.$$

In block 3, the value of the fitness function $F(x)$ for each antibody x, which is determined by the specificity of the particular optimization problem, is calculated.

In block 4, the affinity value for each antibody x is calculated.

Affinity is a function that determines the proximity of antibody x to the best antibody in the current population and is calculated based on the utility function. The affinity value is calculated as

$$\Phi(x) = \frac{\max\limits_{x \in X^{(n)}} F(x) - F(x)}{\max\limits_{x \in X^{(n)}} F(x) - \min\limits_{x \in X^{(n)}} F(x)}.$$

If $\Phi(x) = 1$, then the antibody is the best.

If $\Phi(x) = 0$, then the antibody is the worst.

In block 5, the mutation probability for each antibody x which depends on the affinity value $\Phi(x)$ and the annealing temperature $T(n)$ is calculated

$$p(x) = \exp\left(-\Phi(x)\right)\exp\left(-1/T(n)\right).$$

In block 6, the cloning operator for each antibody x is executed.

The cloning operator A^{cl} plays a role similar to the operator of genetic algorithm reproduction.

The number of clones q for each antibody x is determined as

$$q = round\left(\alpha \cdot \mu\right),\ \alpha \in (0, 1].$$

As a result of applying the cloning operator A^{cl} to the current population $X^{(n)} = \{x\}$, a set of antibody clones $C = \{c\}$ are formed.

In block 7, the mutation operator for each clone c is executed.

The mutation operator A^{mt} allows to obtain new antibodies from antibody clones with sharply different properties.

The mutation based on the annealing simulation over each component of each clone c is executed when $p(x) < U(0, 1)$.

The features of the proposed variant of the mutation operator are the following:

– there is an inverse relationship between the mutation probability and the affinity value, i.e. the best (in terms of affinity) clones change less often than the worst (in terms of affinity) clones;

– there is an inverse relationship between the mutation probability and the iteration number, i.e. at the initial iterations the entire search space is explored and at the final iterations the search becomes directional.

As a result of applying the mutation operator A^{mt} to a set of antibody clones $C = \{c\}$, a set of mutated clones $\hat{C} = \{\hat{c}\}$ is formed.

In block 8, the reduction operator is executed.

As the reduction operator A^{rd}, the scheme $(\mu + \lambda)$ [9] is used, which provides the direction of the search (the best antibodies are preserved) and

© Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-10

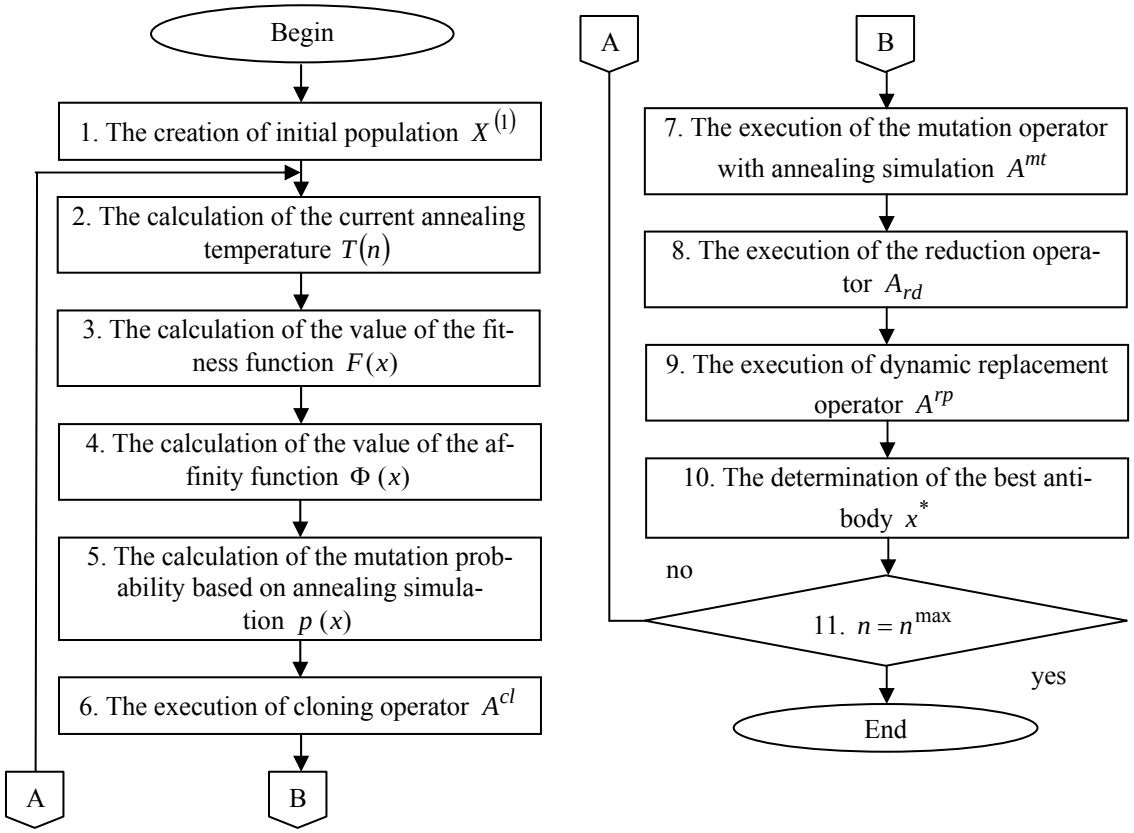


Figure 1 – The sequence of procedures of the optimization method based on clonal selection and annealing simulation

consists in the following. The current population $X^{(n)} = \{x\}$ of power μ and the set of mutated clones $\hat{C} = \{\hat{c}\}$ of power $\lambda = q \cdot \mu$ are combined and ordered by affinity value $\Phi(x)$. The first μ (best in affinity) individuals of the intermediate population are selected for the intermediate population $M = \{m\}$.

In block 9, a dynamic replacement operator is executed.

For a broader study of the search space an operator A^{rp}, which replaces the last (the worst by affinity) antibodies of the intermediate population with new antibodies, is used.

The number of replaced antibodies d is determined as

$$d = round\left(d^{\max}\left(\frac{n^{\max} - n}{n^{\max}} \right) \right),\ d^{\max} \in [0, \mu).$$

A peculiarity of the proposed dynamic replacement operator is the following – there is an inverse relationship between new antibodies number and the iteration number, i.e. at the initial iterations the entire search space is explored and at the final iterations the search becomes directional.

As a result of the application of the replacement operator A^{rp} to the intermediate population $M = \{m\}$, a new population $X^{(n+1)} = \{x\}$ is formed.

In block 10, the best antibody by the value of the fitness function $x^* = \arg \min_{x \in X^{(n+1)}} F(x)$ is determined.

In block 11, the condition for completing the solution search is checked.

If $n = n^{\max}$, then a quasi-optimal solution x^* is obtained.

The adaptation of the optimization method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms for the problem of finding the conditional minimum of the function is given.

The proposed method is used to minimize the function, taking into account equality constraints and inequality constraints. For this task, each antibody is a collection of function arguments, and blocks 1, 3, 7, 9 have the following features.

In block 1 and block 9, each component x_i of each antibody x is initialized as

$$x_i = (x_i^{\max} - x_i^{\min})\, U(0,1) + x_i^{\min},\ i \in \{1, \ldots, I_1\}.$$

© Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-10

In block 3, the value of the fitness function $F(x)$ for each antibody x is calculated as

$$F_w(x) = n\left(\frac{|X_w| - \mu}{\mu}\right)\left(\sum_{z=1}^{Z_1}|h_z(x)| + \sum_{z=1}^{Z_2}(\max\{0, g_z(x)\})\right),$$

$$F(x) = f(x) + F_w(x).$$

In block 7, a mutation based on annealing simulation algorithm over each component c_i of each clone c is executed as

$$r_i = U(0,1),$$

$$\Delta_i = \begin{cases} \delta\,(x_i^{\max} - x_i^{\min})\left(\dfrac{n^{\max} - n}{n^{\max}}\right)\exp\left(-\Phi\,(x)\right)N\,(0,1), & r_i \le p, \\ 0, & r_i > p \end{cases}$$

$$\hat{c}_i = \begin{cases} x_i^{\min}, & (c_i + \Delta_i) \le x_i^{\min} \\ (c_i + \Delta_i), & x_i^{\min} < (c_i + \Delta_i) < x_i^{\max} \\ x_i^{\max}, & (c_i + \Delta_i) \ge x_i^{\max} \end{cases}.$$

For this task, the mutation operator, besides the features indicated in the description of the developed method, has the following additional features:

– the value of each component $\hat{c}_i$ is always in the allowable range $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$;

– there is an inverse relationship between the magnitude of the mutation step and the affinity value, i.e. the best (in terms of affinity) clones change less than the worst (in terms of affinity) clones;

– there is an inverse relationship between the magnitude of the mutation step and the iteration number, i.e. at the initial iterations the entire search space is explored and at the final iterations the search becomes directional;

– it does not require the use of binary potential solutions, i.e. there is no need to convert real potential solutions into binary ones before the mutation and to convert binary potential solutions into real ones after the mutation, which reduces the computational complexity of the mutation operator and speeds up the search for a solution.

The adaptation of the optimization method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms to the problem of optimal discrete set partitioning is given.

The proposed method is used to minimize the root-mean-square error of the partition of a finite discrete set into a given number of classes. For this task, each antibody is a set of class centers, and blocks 1, 3, 7, 9 have the following features.

In block 1 and block 9, each component x_{ij} of each antibody x is initialized as

$$x_{ij} = (x_j^{\max} - x_j^{\min})\,U(0,1) + x_j^{\min},$$
$$i \in \{1, \ldots, I_2\},\ j \in \{1, \ldots, J\}.$$

In block 3, the value of the fitness function $F(x)$ for each antibody x is calculated as

$$j_k = \arg\min_{i \in 1, I_2}\|s_k - x_i\|^2,$$
$$s_k \in S,\ k \in \{1, \ldots, K\},$$
$$F(x) = \sum_{k=1}^{K}\left\|s_k - x_{j_k}\right\|^2.$$

In block 7, a mutation based on the annealing simulation algorithm over each component c_{ij} of each clone c is executed as

$$r_{ij} = U(0,1),$$

$$\Delta_j = \begin{cases} \delta\,(x_j^{\max} - x_j^{\min})\left(\dfrac{n^{\max} - n}{n^{\max}}\right)\exp\left(-\Phi\,(x)\right)N(0,1), & r_{ij} \le p\,(x), \\ 0, & r_{ij} > p\,(x) \end{cases}$$

$$\hat{c}_{ij} = \begin{cases} x_j^{\min}, & (c_{ij} + \Delta_{ij}) \le x_j^{\min} \\ (c_{ij} + \Delta_{ij}), & x_j^{\min} < (c_{ij} + \Delta_{ij}) < x_j^{\max} \\ x_j^{\max}, & (c_{ij} + \Delta_{ij}) \ge x_j^{\max} \end{cases}.$$

For this task, the mutation operator, besides the features indicated in the description of the developed method, has the following additional features:

– the value of each component $\hat{c}_{ij}$ is always in the allowable range $[x_j^{\min}, x_j^{\max}]$;

– there is an inverse relationship between the magnitude of the mutation step and the affinity value, i.e. the best (in terms of affinity) clones change less than the worst (in terms of affinity) clones;

– there is an inverse relationship between the magnitude of the mutation step and the iteration number, i.e. at the initial iterations the entire search space is explored and at the final iterations the search becomes directional;

– it does not require the use of binary potential solutions, i.e. there is no need to convert real potential solutions into binary ones before the mutation and convert binary potential solutions into real ones after the mutation, which reduces the computational complexity of the mutation operator and speeds up the search for a solution.

The adaptation of the optimization method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms for the traveling salesman problem is given.

The proposed method is used to minimize the length of the route, passing only once through all points. For this

© Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-10

task, each antibody is a collection of route points, and blocks 1, 3, 7, 9 have the following features.

In block 1 and block 9, each component x_i of each antibody x is initialized with a randomly selected route point number, and the point numbers should not be duplicated.

In block 3, the value of the fitness function $F(x)$ for each antibody x is calculated as

$$F(x) = d_{x_I,x_1} + \sum_{i=1}^{I_3-1} d_{x_i,x_{i+1}} .$$

In block 7, the mutation based on an annealing simulation algorithm over each component c_i and a randomly selected component c_k of each clone is executed as

$$r_i = U(0,1),$$
$$k = round\ ((I_3 - 1)\ U\ (0,1) + 1),$$
$$\hat{c}_i = \begin{cases} c_k, & r_i \le p(x) \\ c_i, & r_i > p(x) \end{cases},$$
$$\hat{c}_k = \begin{cases} c_i, & r_i \le p(x) \\ c_k, & r_i > p(x) \end{cases}.$$

For this task, the mutation operator, besides the features indicated in the description of the developed method, has the following additional features:

– the value of each component always belongs to an admissible set $\{1,...,I_3\}$;

– it does not require the use of binary potential solutions, i.e. there is no need to convert integer potential solutions into binary ones before the mutation and to convert binary potential solutions into real ones after mutation, which reduces the computational complexity of the mutation operator and speeds up the search for a solution.

The adaptation of the optimization method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms for the knapsack problem is given.

The proposed method is used to select from a given set of objects with the properties "cost" and "weight" the subset with the maximum cost, while observing the limit on the total weight. For this task, each antibody is a collection of weights, and blocks 1, 3, 7, 9 have the following features.

In block 1 and block 9, each component x_i of each antibody x is initialized as

$$x_i = round\ (U(0,1)),\ \ i \in \{1, \ldots, I_4\}.$$

In block 3, the value of the fitness function $F(x)$ for each antibody x is calculated as

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^{I_4} v_i}{\sum_{i=1}^{I_4} v_i x_i},$$
$$F_w(x) = n\left(\frac{|X_w| - \mu}{\mu}\right)\left(\max\left\{0, \sum_{i=1}^{I_4} w_i x_i - W\right\}\right),$$
$$F(x) = f(x) + F_w(x).$$

In block 7, the mutation based on an annealing simulation algorithm over each component c_i of each clone c is executed as

$$r_i = rand\ (),$$
$$\hat{c}_i = \begin{cases} 1, & (r_i \ge p\ (x) \wedge (c_i = 1)) \vee ((r_i < p\ (x)) \wedge (c_i = 0)) \\ 0, & (r_i \ge p\ (x) \wedge (c_i = 0)) \vee ((r_i < p\ (x)) \wedge (c_i = 1)) \end{cases}.$$

For this problem, the mutation operator has the features indicated in the description of the developed method.

4 EXPERIMENTS

A numerical study of the proposed optimization method was carried out using the CUDA technology of information parallel processing, the number of threads in the block corresponded to the population size, the population was sorted based on the paired-disparity sorting algorithm, the antibody with the lowest value of the fitness function was searched.

Let the size of the population $\mu = 100$, the maximum number of iterations $n^{\max} = 100$, the initial temperature $T_0 = 106$, the cooling ratio $\beta = 0.94$, the cloning parameter α=0.1, the maximum number of antibodies replaced $d^{\max} = 0.2\,\mu$.

For the task of:

– finding the conditional minimum of the function, the search for a solution was carried out on Rosenbrock test function $f(x,y) = (1-x)^2 + 100(y-x^2)^2$ with constraints $(x-1)^3 - y + 1 \le 0$ and $x + y - 2 \le 0$, and, moreover, $-1.5 \le x \le 1.5$, $-0.5 \le x \le 2.5$;

– optimal partitioning of a discrete set, the search for a solution was carried out on the standard BSDS500 database;

– "the traveling salesman", the search for a solution was conducted on the standard berlin52 database;

– "the knapsack", the search for a solution was carried out on the standard KNAPSACK_01 database.

The study leads to the conclusion that the proposed method provides a high accuracy of finding a solution.

5 RESULTS

The function of the annealing temperature decrease is determined by the formula $T(n) = \beta^n\ T_0$ and is shown in Fig. 2.

© Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-10

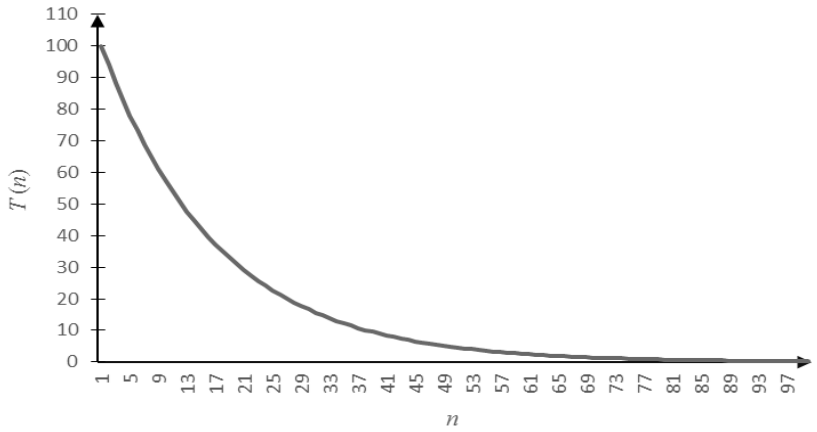


Figure 2 – The function of the annealing temperature decrease

The dependence (Fig. 2) of the annealing temperature on the iteration number shows that the annealing temperature decreases with increasing of the iteration number.

The mutation probability in the case for the worst antibody $(\Phi(x)=0)$ is determined by the formula $p(x)=\exp(-1/T(n))$ and is shown in Fig. 3.

The dependence (Fig. 3) of the mutation probability on the annealing temperature shows that the mutation probability decreases with temperature decreasing.

The results of the comparison of the proposed method with the method based on the theory of clonal selection and described in [16–22] are presented in Table 1.

6 DISCUSSION

The selected values of the parameters of the proposed optimization method provide a high probability of mutation at the initial iterations and a low probability of mutation at the final iterations. For example, for the worst antibody with the maximum probability of mutation, the mutation occurs with a probability of no less than 0.9 for the first 40% iterations and with a probability below 0.1 for the last 10% iterations (Fig. 3).

Method based on clonal selection theory [16–22]:

– does not take into account the iteration number in the operator of mutation and replacement, which reduces the accuracy of the search for a solution (Table 1);

– does not allow real potential solutions in the mutation operator, which increases the computational complexity of the mutation operator and slows down the search for a solution. This is due to the need to convert non-binary potential solutions into binary before the mutation and binary potential solutions into non-binary after mutation (Table 1);

– does not allow to find the conditional extremum.

The proposed method allows to eliminate these drawbacks.

CONCLUSIONS

In this paper, the actual scientific and technical problem of increasing the efficiency of optimization methods was solved by dint of creates the method of finding a quasi-optimal solution by a metaheuristic.

The scientific novelty of obtained results is that the optimization method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms is proposed. It allows to increase the search accuracy through the application of the principle of organizing the study of the entire search space at the initial iterations and focusing of the search on the final iterations.

The adaptation of the proposed method both for the problem of finding the conditional minimum of functions and for the problem of optimal partitioning of a discrete set:

– allows real potential solutions in the mutation operator, which reduces the computational complexity of the mutation operator and speeds up the search for a solution;

– uses a dynamic mutation step, which allows to investigate the entire search space at the initial iterations and to make the search directional at the final iterations, that ensures high accuracy of the search.

The solution of finding the problem of conditional minimum of functions and the knapsack problem by the proposed method uses a penalty function, which allows to find a conditional extremum.

In addition, the application of the proposed method for solving the traveling salesman problem allows integer potential solutions in the mutation operator, which reduces the computational complexity of the mutation operator and speeds up the search for a solution.

The practical significance of the obtained results lies in the fact that the scope of application of metaheuristics is expanding on the basis of the theory of clonal selection by adapting the proposed method for the indicated optimization problems. This contributes to the effectiveness of intelligent computer systems for general and special purposes.

Prospects for further research are the study of the proposed method for a wide class of artificial intelligence tasks.

© Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-10

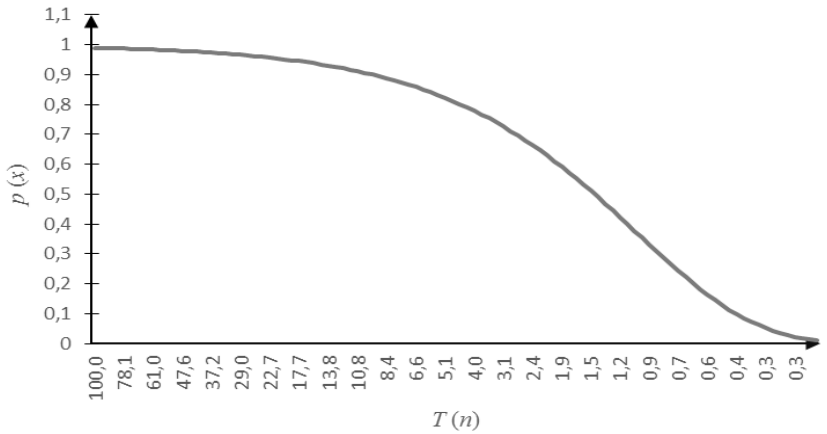


Figure 3 – The mutation probability

Table 1 – The comparison of the proposed optimization method with the existing one for solving optimization problems

No.	Problem of	Root-mean-square error of the method		Conversion time of antibody clones of the method	
		proposed	existing	proposed	existing
1	finding the conditional minimum of the function	0.02	0.07	–	proportionally $\mu q I_1$
2	optimal partitioning of a discrete set	0.02	0.06	–	proportionally $\mu q I_2$
3	"the traveling salesman"	0.03	0.08	–	proportionally $\mu q I_3$
4	"the knapsack"	0.04	0.1	–	–

ACKNOWLEDGEMENTS

The studies were carried out in accordance with the priority direction of the development of science and technology in Ukraine until 2020 "Information and Communication Technologies" and contain some results of the state budget scientific research project "Methods, models for the processing of intelligent, information technologies for highly efficient computing and local control subsystems in problem-oriented systems" (state registration number 0106U004501) and "Basic components of microprocessor control systems by laser technological complexes on the basis of table-algorithmic methods, models and incomplete similarity theory" (state registration number 0113U003345).

REFERENCES

1. Talbi El-G. Metaheuristics: from design to implementation Hoboken, New Jersey, Wiley & Sons, 2009, 618 p. DOI: 10.1002/9780470496916
2. Engelbrecht A. P. Computational intelligence: an introduction. Chichester, West Sussex, Wiley & Sons, 2007, 630 p. DOI: 10.1002/9780470512517
3. Yu X., Gen M. Introduction to evolutionary algorithms. London, Springer-Verlag, 2010, 433 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-129-5
4. Nakib A., Talbi El-G. Metaheuristics for Medicine and Biology. Berlin, Springer-Verlag, 2017, 211 p. DOI: 10.1007/978-3-662-54428-0
5. Yang X.-S. Nature-inspired Algorithms and Applied Optimization. Charm, Springer, 2018, 330 p. DOI: 10.1007/978-3-642-29694-9
6. Subbotin S. Oliinyk A. , Levashenko V. , Zaitseva E. Diagnostic Rule Mining Based on Artificial Immune System for a Case of Uneven Distribution of Classes in Sample, *Communications*, 2016, Vol. 3, pp. 3–11.
7. Blum C., Raidl G. R. Hybrid Metaheuristics. Powerful Tools for Optimization. Charm, Springer, 2016, 157 p. DOI: 10.1007/978-3-319-30883-8
8. Glover F., Kochenberger G. A. . Handbook of metaheuristics. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2003, 570 p. DOI: 10.1007/B101874
9. Yang X.-S. Optimization Techniques and Applications with Examples. Hoboken, New Jersey : Wiley & Sons, 2018, 364 p. DOI: 10.1002/9781119490616
10. Martí R., Pardalos P. M., Resende M. G. C. Handbook of Heuristics. Charm, Springer, 2018, 1289 p. DOI: 10.1007/978-3-319-07124-4
11. Gendreau M., Potvin J.-Y. Handbook of Metaheuristics. New York, Springer, 2010, 640 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-1665-5
12. Doerner K. F., Gendreau M., Greistorfer P., Gutjahr W., Hartl R. F. , Reimann M. Metaheuristics. Progress in Complex Systems Optimization. New York, Springer, 2007, 408 p. DOI: 10.1007/978-0-387-71921-4
13. Bozorg Haddad O., Solgi M., Loaiciga H. Meta-heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization. Hoboken, New Jersey, Wiley & Sons, 2017, 293 p. DOI: 10.1002/9781119387053
14. Chopard B., Tomassini M. An Introduction to Metaheuristics for Optimization. New York, Springer, 2018, 230 p. DOI: 10.1007/978-3-319-93073-2
15. Radosavljević J. Metaheuristic Optimization in Power Engineering. New York, Institution of Engineering and Technology, 2018, 536 p. DOI: 10.1049/PBPO131E
16. de Castro L. N., von. Zuben F. J. The clonal selection algorithm with engineering applications, *The Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'00) : Workshop on Artificial Immune Systems and Their Applications : proceedings*. Las Vegas, 2000, pp. 36–39.
17. de Castro L. N., von. Zuben F. J. Learning and optimization using clonal selection principle, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation,* 2002, Vol. 6, pp. 239–251. DOI: 10.1109/TEVC.2002.1011539
18. Babayigit B., Guney K., Akdagli A. A clonal selection algorithm for array pattern nulling by controlling the positions of selected elements, *Progress in Electromagnetics Research*, 2008, Vol. 6, pp. 257–266. DOI: 10.2528/PIERB08031218
19. White J. A., Garrett S. M. In: Timmis J., Bentley P. J., Hart E. (eds). Improved pattern recognition with artificial clonal selec-

© Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-10

tion, *Artificial Immune Systems: ICARIS-2003*. Berlin, Springer, 2003, pp. 181–193. (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2787). DOI: 10.1007/978-3-540-45192-1_18

20. Alba E., Nakib A., Siarry P. Metaheuristics for Dynamic Optimization, Berlin, Springer-Verlag, 2013, 398 p. DOI: 10.1007/978-3-642-30665-5
21. Du K.-L., Swamy M. N. S. Search and Optimization by Metaheuristics. Techniques and Algorithms Inspired by Nature. Charm, Springer, 2016, 434 p. DOI: 10.1007/978-3-319-41192-7
22. Brownlee J. Clever algorithms: nature-inspired programming recipes. Melbourne, Brownlee, 2011, 436 p.

Received 28.01.2019.
Accepted 21.02.2019.

УДК 004.93

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ СИНТЕЗУ АЛГОРИТМІВ КЛОНАЛЬНОГО ВІДБОРУ ТА ІМІТАЦІЇ ВІДПАЛУ

Григор О. О. – канд. держ. упр. наук, доцент, ректор Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна.

Федоров Є. Є. – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна.

Уткіна Т. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна.

Лукашенко А. Г. – канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона, Київ, Україна.

Рудаков К. С. – канд. техн. наук, старший викладач кафедри робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна.

Гардер Д. А. – молодший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона, Київ, Україна.

Лукашенко В. М. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри кафедри робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянута задача підвищення ефективності методів оптимізації шляхом синтезу метаевристик. Об'єктом дослідження є процес пошуку рішення оптимізаційних задач.

Метою роботи є підвищення ефективності пошуку квазіоптимального рішення за рахунок метаевристичного методу на основі синтезу алгоритмів клонального відбору та імітації відпалу.

Метод. Запропонований метод оптимізації удосконалює алгоритм клонального відбору за рахунок динамічної зміни на основі алгоритму імітації відпалу кроку мутації, ймовірності мутації, кількості замінних потенційних рішень. Це зменшує ризик потрапляння в локальний оптимум завдяки широкому дослідженню простору пошуку на початкових ітераціях й гарантує збіжність через спрямованість пошуку на заключних ітераціях. Запропонований метод оптимізації дозволяє знаходити умовний мінімум за рахунок динамічної штрафної функції, значення якої зростає зі збільшенням номера ітерації. Запропонований метод оптимізації допускає небінарні потенційні рішення в операторі мутації завдяки використанню стандартного нормального розподілу замість рівномірного розподілу.

Результати. Запропонований метод оптимізації був програмно реалізований за допомогою технології паралельної обробки інформації CUDA і досліджений для задачі знаходження умовного мінімуму функції, задачі оптимального розбиття дискретної множини, задачі комівояжера, задачі про рюкзак на відповідних їм проблемно-орієнтованих базах даних. Отримані результати дозволили досліджувати залежність значень параметрів на ймовірність мутації.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу та дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при вирішенні задач оптимізації. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні інтелектуальних паралельних й розподілених комп'ютерних систем загального і спеціального призначення, які використовують запропонований метод для задач чисельної та комбінаторної оптимізації, машинного навчання й розпізнавання образів, прогнозу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: метаевристика, клональний відбір, імітація відпалу, оптимізація, технологія паралельної обробки інформації.

УДК 004.93

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ КЛОНАЛЬНОГО ОТБОРА И ИМИТАЦИИ ОТЖИГА

Григор О. А. – канд. гос. упр. наук, доцент, ректор Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина.

Федоров Е. Е. – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры робототехники и специализированных компьютерных систем Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина.

Уткина Т. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры робототехники и специализированных компьютерных систем Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина.

Лукашенко А. Г. – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института электросварки им. Е. О. Патона, Киев, Украина.

Рудаков К. С. – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры робототехники и специализированных компьютерных систем Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина.

Гардер Д. А. – младший научный сотрудник Института электросварки им. Е. О. Патона, Киев, Украина.

Лукашенко В. М. – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой робототехники и специализированных компьютерных систем Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина.

© Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-10

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена задача повышения эффективности методов оптимизации путем синтеза метаэвристик. Объектом исследования является процесс поиска решения оптимизационных задач.

Целью работы является повышение эффективности поиска квазиоптимального решения за счет метаэвристического метода на основе синтеза алгоритмов клонального отбора и имитации отжига.

Метод. Предложенный метод оптимизации усовершенствует алгоритм клонального отбора за счет динамического изменения на основе алгоритма имитации отжига шага мутации, вероятности мутации, количества заменяемых потенциальных решений. Это уменьшает риск попадания в локальный оптимум благодаря широкому исследованию пространства поиска на начальных итерациях и гарантирует сходимость из-за направленности поиска на заключительных итерациях. Предложенный метод оптимизации позволяет находить условный минимум за счет динамической штрафной функции, значение которой возрастает с увеличением номера итерации. Предложенный метод оптимизации допускает небинарные потенциальные решения в операторе мутации благодаря использованию стандартного нормального распределения вместо равномерного распределения.

Результаты. Предложенный метод оптимизации был программно реализован посредством технологии параллельной обработки информации CUDA и исследован для задачи нахождения условного минимума функции, задачи оптимального разбиения дискретного множества, задачи коммивояжера, задачи о рюкзаке на соответствующих им проблемно-ориентированных базах данных. Полученные результаты позволили исследовать зависимость значений параметров на вероятность мутации.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода и позволяют рекомендовать его для использования на практике при решении задач оптимизации. Перспективы дальнейших исследований заключаются в создании интеллектуальных параллельных и распределенных компьютерных систем общего и специального назначения, которые используют предложенный метод для задач численной и комбинаторной оптимизации, машинного обучения и распознавания образов, прогноза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метаэвристика, клональный отбор, имитация отжига, оптимизация, технология параллельной обработки информации.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Talbi El-G. Metaheuristics: from design to implementation / El-G. Talbi. – Hoboken, New Jersey : Wiley & Sons, 2009. – 618 p. DOI: 10.1002/9780470496916
2. Engelbrecht A. P. Computational intelligence: an introduction / A. P. Engelbrecht. – Chichester, West Sussex : Wiley & Sons, 2007. – 630 p. DOI: 10.1002/9780470512517
3. Yu X. Introduction to evolutionary algorithms / X. Yu, M. Gen. – London : Springer-Verlag, 2010. – 433 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-129-5
4. Nakib A. Metaheuristics for Medicine and Biology / A. Nakib, El-G. Talbi. – Berlin : Springer-Verlag, 2017. – 211 p. DOI: 10.1007/978-3-662-54428-0
5. Yang X.-S. Nature-inspired Algorithms and Applied Optimization / X.-S. Yang. – Charm : Springer, 2018. – 330 p. DOI: 10.1007/978-3-642-29694-9
6. Subbotin S. Diagnostic Rule Mining Based on Artificial Immune System for a Case of Uneven Distribution of Classes in Sample / S. Subbotin, A. Oliinyk, V. Levashenko, E. Zaitseva // Communications. – 2016. – Vol. 3. – P. 3–11.
7. Blum C. Hybrid Metaheuristics. Powerful Tools for Optimization / C. Blum, G. R. Raidl. – Charm : Springer, 2016. – 157 p. DOI: 10.1007/978-3-319-30883-8
8. Glover F. Handbook of metaheuristics / F. Glover, G. A. Kochenberger. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2003. – 570 p. DOI: 10.1007/B101874
9. Yang X.-S. Optimization Techniques and Applications with Examples / X.-S. Yang. – Hoboken, New Jersey : Wiley & Sons, 2018. – 364 p. DOI: 10.1002/9781119490616
10. Martí R. Handbook of Heuristics / R. Martí, P. M. Pardalos, M. G. C. Resende. – Charm : Springer, 2018. – 1289 p. DOI: 10.1007/978-3-319-07124-4
11. Gendreau M. Handbook of Metaheuristics / M. Gendreau, J.-Y. Potvin. – New York : Springer, 2010. – 640 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-1665-5
12. Metaheuristics. Progress in Complex Systems Optimization / [K. F. Doerner, M. Gendreau, P. Greistorfer et al.], W. Gutjahr, R. F. Hartl, M. Reimann. – New York : Springer, 2007. – 408 p. DOI: 10.1007/978-0-387-71921-4
13. Bozorg Haddad O. Meta-heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization / O. Bozorg Haddad, M. Solgi, H. Loaiciga. – Hoboken, New Jersey : Wiley & Sons, 2017. – 293 p. DOI: 10.1002/9781119387053
14. Chopard B. An Introduction to Metaheuristics for Optimization / B. Chopard, M. Tomassini. – New York : Springer, 2018. – 230 p. DOI: 10.1007/978-3-319-93073-2
15. Radosavljević J. Metaheuristic Optimization in Power Engineering / J. Radosavljević. – New York : Institution of Engineering and Technology, 2018. – 536 p. DOI: 10.1049/PBPO131E
16. de Castro L. N. The clonal selection algorithm with engineering applications / L. N. de Castro, F. J. von. Zuben // The Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'00) : Workshop on Artificial Immune Systems and Their Applications : proceedings. – Las Vegas, 2000. – P. 36–39.
17. de Castro L. N. Learning and optimization using clonal selection principle / L. N. de Castro, F. J. von. Zuben // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6. – P. 239–251. DOI: 10.1109/TEVC.2002.1011539
18. Babayigit B. A clonal selection algorithm for array pattern nulling by controlling the positions of selected elements / B. Babayigit, K. Guney, A. Akdagli // Progress in Electromagnetics Research. – 2008. – Vol. 6. – P. 257–266. DOI: 10.2528/PIERB08031218
19. White J. A. Improved pattern recognition with artificial clonal selection / J. A. White, S. M. Garrett // In: Timmis J., Bentley P. J., Hart E. (eds). Artificial Immune Systems: ICARIS-2003. – Berlin : Springer, 2003. – P. 181–193. – (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2787). DOI: 10.1007/978-3-540-45192-1_18
20. Alba E. Metaheuristics for Dynamic Optimization / E. Alba, A. Nakib, P. Siarry. – Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 398 p. DOI: 10.1007/978-3-642-30665-5
21. Du K.-L. Search and Optimization by Metaheuristics. Techniques and Algorithms Inspired by Nature / K.-L. Du, M. N. S. Swamy. – Charm : Springer, 2016. – 434 p. DOI: 10.1007/978-3-319-41192-7
22. Brownlee J. Clever algorithms: nature-inspired programming recipes / J. Brownlee. – Melbourne : Brownlee, 2011. – 436 p.

© Grygor O. O., Fedorov E. E., Utkina T. Yu., Lukashenko A. G., Rudakov K. S., Harder D. A., Lukashenko V. M., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-10

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 004.932.2:004.93’1

ВИВЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДЕЛІ БЛОЧНОГО ПОДАННЯ ДЛЯ МНОЖИНИ ДЕСКРИПТОРІВ КЛЮЧОВИХ ТОЧОК ЗОБРАЖЕНЬ

Гороховатський В. О. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

Гадецька С. В. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних технологій, Харківський навчально-науковий інститут ДВНЗ «Університет банківської справи», Харків, Україна.

Стяглик Н. І. – канд. пед. наук, доцент кафедри інформаційних технологій, Харківський навчально-науковий інститут ДВНЗ «Університет банківської справи», Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Багатовимірна природа оброблюваних даних у сучасних системах комп’ютерного зору потребує нових підходів до побудови результативних просторів ознак, що спрощують опрацювання за рахунок узагальнення наявної інформації. Структурні методи розпізнавання зображень використовують описи візуальних об’єктів у вигляді наборів дескрипторів ключових точок як множини числових векторів високої розмірності. Основним інструментом зниження розмірності виступає представлення даних у вигляді системи їх блоків та статистичне дослідження таких структур даних, яке в аспекті розпізнавання покладене відображати сумарні властивості об’єкта як сукупності його фрагментів. У зв’язку з цим виникає проблема вивчення особливостей прикладного застосування та характеристик моделі блочного подання в аспекті її вживання для визначення релевантності описів та класифікації даних в межах бази еталонних зображень.

Мета роботи. Здійснення статистичного оцінювання значущості прийняття класифікаційних рішень на основі обчислення релевантності описів об’єктів для моделі блочного подання даних дескрипторів ключових точок зображень.

Метод. Запропоновано способи розрізнення описів на основі моделі блочного подання даних дескрипторів ключових точок зображень із використанням критеріїв математичної статистики та інструментарію теорії інформації.

Результати. Головним результатом статті є підтвердження того, що вживання класичних статистичних критеріїв для аналізу емпіричних даних у вигляді структурних описів зображень дає можливість визначити якість побудованого простору ознак, достатню для розрізнення візуальних об’єктів при їх розпізнаванні у системах комп’ютерного зору. Впровадження моделі блочного подання та статистичного аналізу для значень дескрипторів ключових ознак зображень сприяє підвищенню ефективності процесу розпізнавання візуальних об’єктів, що підтверджується покращенням рівня розрізнення при збільшенні розміру фрагменту у побудованій ланцюжковій структурі опису.

Висновки. Застосування різноманіття статистичних критеріїв дало ідентичний висновок про значущість відмінностей емпіричних описів візуальних об’єктів у побудованому просторі ознак, що підкреслює об’єктивність проведеного дослідження. Впроваджена модель блочного подання даних зберігає розрізнювальні властивості структурного опису з ефектом суттєвого покращення швидкодії прийняття класифікаційного рішення.

Наукову новизну дослідження складає удосконалення та статистичне обґрунтування моделей прийняття рішення щодо розпізнавання візуальних об’єктів на основі обчислення релевантності їх описів стосовно еталонів із впровадженням блочного подання дескрипторів ключових точок зображень.

Практична значущість роботи полягає у підтвердженні доцільності введення блочної структури для дескрипторного опису об’єкта як ефективного підходу при вирішенні задачі розпізнавання на прикладах зображень задля впровадження у системах комп’ютерного зору.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: комп’ютерний зір, структурне розпізнавання зображень, множина ключових точок, дескриптори BRISK, релевантність описів, блочне подання, статистичний розподіл, критерій хі-квадрат, розходження Рен’ї, критерій знаків, значущість відмінності описів.

© Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Стяглик Н. І., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-11

АБРЕВІАТУРИ

BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) – метод виявлення, опису та відповідності ключових точок;

Open CV – бібліотека програмного забезпечення для систем комп'ютерного зору;

КТ – ключова точка.

НОМЕНКЛАТУРА

Z – опис у вигляді множини КТ;

B^n – множина бінарних векторів;

z_v – бінарний дескриптор;

n – розмірність простору дескрипторів;

s – кількість дескрипторів у описі;

m – кількість фрагментів (блоків) дескриптора;

k – кількість елементів у блоці у дескрипторі;

Q – множина розподілів для блоків дескриптора;

q_{ij} – елементи матриці розподілів Q;

p_i – відносна частота;

W – кількість ланок розподілу;

a – рівень значущості при застосуванні статистичного критерію.

ВСТУП

Процес реалізації дієвих класифікаційних рішень у сучасних системах комп'ютерного зору потребує вирішення ряду проблем, пов'язаних із багатовимірною природою оброблюваних даних. У структурних методах розпізнавання зображень описи візуальних об'єктів подаються у вигляді наборів дескрипторів КТ як скінченної множини числових векторів достатньо високої розмірності [1–4]. Так, бінарні подання, отримані детектором BRISK, містять до 512 компонентів [5]. У такому випадку перехід до представлення даних у вигляді системи їх фрагментів меншої розмірності сприяє суттєвому спрощенню їх вивчення та прикладного застосування [6]. Основним інструментом при цьому виступає статистичне дослідження даних описів, яке в аспекті розпізнавання покладене відображати узагальнені властивості об'єкта у вигляді сукупності фрагментів [6–8].

Бітова природа дескрипторів КТ у просторі бінарних векторів дає можливість впровадити представлення та аналіз дескриптора як послідовності елементів із відомим діапазоном значень, що дає змогу здійснювати оброблення та статистичний аналіз упорядкованих числових ланцюжків даних. Блочна структура даних допускає застосування підходів інтелектуального аналізу, заснованих на ймовірнісних оцінках наявних значень, щодо прийняття рішення про віднесення об'єкту з описом до відповідного класу.

Об'єктом дослідження є модель блочного подання для множини дескрипторів ключових точок зображення.

Предметом дослідження є статистичне оцінювання значущості прийняття класифікаційних рішень на основі обчислення релевантності описів об'єктів для моделі блочного подання даних дескрипторів ключових точок зображень.

© Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Стяглик Н. І., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-11

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Визначимо дескрипторний опис досліджуваного візуального об'єкту у вигляді скінченної множини

$$Z = \{z_v\}_{v=1}^{s},\ z_v \in B^n .$$

Виходячи з того, що параметр n розміру аналізованих елементів – дескрипторів сягає кількох сотень, понизимо розмірність даних шляхом розбиття дескриптора КТ на послідовність із m фрагментів ($m = n$), що повністю його покривають. У такому разі дескриптор BRISK із 512 бітів може бути представлено, наприклад, послідовністю із 512 фрагментів по одному біту (0 або 1), або послідовністю із 256 фрагментів по 2 елементи, які можуть мати одне з двійкових представлень 00, 01, 10, 11, або послідовністю із 128 фрагментів по 4 елементи, кожен з яких має вид кортежу двійкових елементів (кількість таких представлень тут дорівнює 16) тощо.

У результаті ланцюжкового подання опис Z буде мати вид матриці із S рядків та m стовпців, кожен з елементів якої є фрагментом розміру $k = n/m$ [4].

У результаті розбиття на фрагменти здійснено перехід від багатовимірного векторного простору ознак до сукупності векторів суттєво меншої розмірності. Виникає питання, наскільки новостворена система ознак здатна до розрізнення описів об'єктів у порівнянні з багатовимірним представленням та які нові можливості у аспекті класифікації відкриваються із її впровадженням.

Задачами дослідження є вивчення доцільності та результативності застосування моделі блочної структури представлення даних дескрипторного опису об'єкта у вигляді ланцюжкової структури як продуктивного підходу для розрізнення досліджуваних об'єктів.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Формальна постановка задачі розпізнавання зображень з використанням множини КТ сформульована у [1], де також вивчаються особливості та недоліки моделі опису як множини багатовимірних векторів. Зазначається, що ключовим недоліком є завеликі об'єми обчислювальних витрат. У статтях [2, 3] вивчаються моделі для побудови модифікацій системи структурних ознак задля скорочення обсягу обчислень, зокрема, розглядається застосування методів кластеризації даних. Роботи [4, 6, 7] містять аналіз блочного подання та засоби конструювання статистичних розподілів, що дають можливість сформувати узагальнене подання дескрипторів у вигляді їх системи фрагментів. У дослідженнях [4, 7, 8] викладено результати застосування статистичних мір для обчислення релевантності описів, що підкреслює тісний зв'язок метричних та статистичних підходів. Робота [5] містить особливості формування бінарного дескриптора BRISK, що дає можливість застосувати ефективне бінарне оброблення даних. Роботи [9–14]

використано як джерела класичних методів статистичного оцінювання, а [15] містить посилання на використане програмне забезпечення.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглянемо відображення $Z \to Q$ із множини бінарних векторів – дескрипторів КТ у множину Q їх блочних розподілів, яке дає можливість проводити ідентифікацію та розрізнення візуальних об'єктів на підставі даних меншої розмірності [4]. Розподіл відповідно до фіксованого фрагменту із номером *j, j=1,…,m*, подамо у вигляді вектора цілих чисел $q_j = (q_1,...,q_w)_j$, де $q_{ij}, i = 1,...,w$ – частота появи *i*-го виду фрагменту, розташованого на *j*-му місці ланцюжка серед усіх дескрипторів опису, кількість яких дорівнює $s = \sum_{i=1}^{w} q_i$ для будь-якого номера *j*.

Значення $p_i = \frac{q_i}{s}, i = 1,...,w$, є відносними частотами (оцінками ймовірності). При цьому $w = 2^k$, $\sum_{i=1}^{w} p_i = 1$. Повністю множина Q описується системою розподілів

$$Q = \{q_j = (q_1,...,q_w)_j\}_{j=1}^{m} \quad (1)$$

для кожного із *m* фрагментів, отже, може бути представлена матрицею із *m* рядків та *w* стовпців. Для нормованого випадку маємо систему розподілів

$$Q_{norm} = \{p_j = (p_1,...,p_w)_j\}_{j=1}^{m}. \quad (2)$$

Наприклад, у випадку використання дескриптора BRISK при розбитті на байти для *n*=512 маємо *m*=64, *w*=256, отже, матриця Q (Q_{norm}) містить відносні частоти появи всіх допустимих значень фрагментів розміром у байт для наявної множини *Z*.

Основна ідея дослідження полягає у здійсненні аналізу властивостей релевантності об'єктів шляхом зіставлення сформованих значень елементів матриць $Q^l = \{q_{ij}^{(l)}\}, i = 1,...,w,\ j = 1,...,m,\ l = 1,2$ (l – номер об'єкту) вигляду (1), (2), що відображають внутрішню статистику описів. Зосередимо дослідження на попарному порівнянні відповідних рядків матриць Q^l.

Першочергово видається вирішення задачі порівняння двох розподілів, яку можна здійснити співставленням гістограм через застосування модифікованого критерію хі-квадрат, призначеного для випадку емпіричних розподілів [9]. Розрахунок емпіричного значення критерію для фрагментів описів з номером *j* здійснимо за формулою

$$\chi^2_{emp,j} = \sum_{i-1}^{w} \frac{(q_{ij}^{(1)} - q_{ij}^{(2)})^2}{q_{ij}^{(1)} + q_{ij}^{(2)}}. \quad (3)$$

Критичне значення критерію $\chi^2_{cr,j}(a,s')$ знаходиться за встановленим рівнем значущості *a* і ступенем свободи *s'*, що не перевищує *s*–1 (*s* розглядається як кількість спостережень) і розраховується лише для тих типів ланок, які входять до відповідного фрагменту з опису хоча б одного з об'єктів. Область прийняття нульової гіпотези про однорідність аналізованих гістограм визначається нерівністю $\chi^2_{emp,j} < \chi^2_{cr,j}(a,s')$, а область прийняття альтернативної гіпотези щодо значущої відмінності між ними на рівні значущості *a* є правосторонньою критичною областю, що визначається нерівністю $\chi^2_{emp,j} > \chi^2_{cr,j}(a,s')$.

Наступний крок передбачає підрахунок долі значущо відмінних розподілів, на підставі чого робиться висновок про рівень релевантності об'єктів. Природнім видається очікування підвищення точності розпізнавання при збільшенні довжини *k* фрагменту у ланцюжковому поданні.

Іншим способом зіставлення розподілів є застосування в якості міри релевантності α-розходження Рен'ї [7, 10], яке можна розглядати як інформацію порядку $\alpha(\alpha > 0, \alpha \neq 1)$ щодо їх відмінності. Обчислення розходження Рен'ї $D_{\alpha j}(p_j^{(1)} \| p_j^{(2)}),\ j = 1,...,m$, щодо відмінності об'єкту з розподілом $p_j^{(1)} = (p_1,...,p_w)_j^{(1)}$, від об'єкту з розподілом $p_j^{(2)} = (p_1,...,p_w)_j^{(2)}$ (для кожного фіксованого $j = 1,...,m$), здійснюємо, виходячи з рядків матриць $Q_{norm}^l = \{p_{ij}^{(l)}\}, i = 1,...,w,\ j = 1,...,m,\ l = 1,2$, що саме і мають вигляд $p_j^{(l)} = (p_1,...,p_w)_j^{(l)},\ j = 1,...,m,\ l = 1,2$:

$$D_{\alpha j}(p_j^{(1)} \| p_j^{(2)}) = \frac{1}{\alpha - 1} \ln \sum_{i=1}^{w} \frac{(p_{ij}^{(1)})^{\alpha}}{(p_{ij}^{(2)})^{\alpha - 1}}. \quad (4)$$

Міра (4) є неспадною функцією аргументу α, приймає невід'ємні значення, а нульове значення досягається лише при $p_j^{(1)} = p_j^{(2)}$. Пропонується застосування міри (4) при значенні параметра α=0,5:

$$D_{0,5;j}(p_j^{(1)} \| p_j^{(2)}) = -2 \ln \sum_{i=1}^{w} \sqrt{p_{ij}^{(1)} \cdot p_{ij}^{(2)}},\ j = 1,...,m. \quad (5)$$

Зауважимо, що міра (5) є метрикою, а також єдиним випадком симетричності розходження Рен'ї відносно аргументів. Доведено [11, 12], що α=0,5 є опти-

© Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Стяглик Н. І., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-11

мальним у тому сенсі, що величина $(\alpha-1)\cdot D_\alpha(0-Z^j)$ при α=0,5 приймає найбільше значення, яке відповідає нижній границі ймовірності помилки розпізнавання. З цієї точки зору значення параметру α=0,5 можна вважати найкращим для розрізнення структурних описів.

З метою всебічного оцінювання доцільності введення ланцюжкової структури для опису об'єкта і аналізу його статистичного подання як ефективного підходу для розрізнення об'єктів пропонуємо також перехід від блочного подання цих описів до опису з кодуванням структур фрагмента із заміною розподілу фрагмента числом, яке дорівнює середньому кодових значень. Наприклад, у випадку 2-бітового розбиття дескриптора, одержаного детектором BRISK, кодуємо числами від 1 до 4 послідовність 00, 01, 10, 11, що включає можливі значення фрагмента. Згідно із статистичним поданням виду (2), тепер маємо в межах одного фрагмента з номером j розподіл вигляду $p_j=(p_1,p_2,p_3,p_4)_j$. Відповідно до кодових значень 1, 2, 3, 4, математичне сподівання (середнє значення) розподілу дорівнює:

$$M_j=\sum_{i=1}^{4} ip_{ij},\ j=1,...,256. \qquad (6)$$

Тоді статистичне подання (2), що складається з 256-ти рядків та 4-х стовпців, перетворюється на послідовність із 256-ти елементів, кожний з яких є усередненням фрагмента:

$$M=(M_1,...,M_{256}). \qquad (7)$$

У загальному випадку вирази (6), (7) для об'єкта з номером l=1,2, набувають вигляду

$$M_j^{(1)}=\sum_{i=1}^{w} ip_{ij}^{(1)},\ j=1,...,m, \qquad (8)$$

$$M^{(l)}=(M_1,...,M_m)^{(l)}. \qquad (9)$$

Порівняння двох описів здійснюємо через співставлення різними способами двох кортежів виду (9). Наприклад, порівняння послідовностей $M^{(1)}$, $M^{(2)}$ як двох зв'язних вибірок довільного розподілу можливе із застосуванням непараметричних критеріїв відмінності, наприклад, критерію знаків [13], який на встановленому рівні значущості показує, наскільки односпрямованими за знаком є різниці:

$$M_i^{(2)}-M_i^{(1)},\ i=1,...,w. \qquad (10)$$

Згідно з критерієм знаків розраховуємо окремо суми додатних і від'ємних різниць (10), більша з них призначається типовим зсувом, менша – не типовим. За таблицями [13] значення типового зсуву зіставляється (на певному рівні значущості) з критичним значенням, не перевищення якого величиною нетипового зсуву свідчить про значущу відмінність вибірок.

Іншим способом зіставлення послідовностей $M^{(1)}$, $M^{(2)}$ може бути попарне порівняння значень $M_i^{(1)}$ та $M_i^{(2)}$ послідовно для розподілу кожного фрагмента як двох середніх для довільно розподілених сукупностей за допомогою z-критерію, що є коректним лише у випадку достатньо великих вибірок [14] і узгоджується з вимогою достатньо великого числа s. Розрахунок емпіричного значення критерію здійснимо як

$$z_{emp,j}=\frac{|M_j^{(1)}-M_j^{(2)}|}{\sqrt{(D_j^{(1)}+D_j^{(2)})/s}},\ j=1,...,m, \qquad (11)$$

де $D_j^{(l)}=\sum_{i=1}^{w} p_{ij}^{(l)}(i-M_j^{(l)})^2$, $l=1,2$ – дисперсія вибірки, заданої розподілом $p_j^{(l)}=(p_1,...,p_w)_j^{(l)}$, l=1,2, із відповідними кодовими значеннями i=1,…,w.

Критичне значення критерію $z_{cr,j}(a)$ знаходиться за рівнем значущості a із таблиці значень функції Лапласа $\Phi(x)$: $\Phi(z_{cr,j}(a))=(1-2a)/2$.

Область прийняття нульової гіпотези про рівність усереднених кодових значень в межах j-го фрагмента визначається нерівністю $z_{emp,j}(a)<z_{cr,j}(a)$, область прийняття альтернативної гіпотези визначається нерівністю $z_{emp,j}(a)>z_{cr,j}(a)$. Наступний крок передбачає підрахунок долі таких розподілів фрагментів, відповідні номери яких для обох об'єктів мають значущо відмінні усереднені кодові значення, на підставі чого робиться висновок про рівень релевантності об'єктів. Природнім видається очікування достатньо великого значення такої долі для об'єктів, що дійсно є різними, а також його підвищення при збільшенні фрагмента. Експериментальна частина роботи включає результати тестування та розрахунків за емпіричними даними.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Запропоновані підходи протестовано на прикладі зображень ікон розміром 400x540 із використанням засобів бібліотеки Open CV [6, 7, 15]. Застосовано дескриптори BRISK розмірністю n=512 та числом 700. Приклад розподілу значень описів для пар бітів наведено у табл. 1.

Як бачимо із табл. 1, розподіли фрагментів з однаковими номерами для обох об'єктів досить суттєво відрізняються, що має бути підтверджено відповідними розрахунками.

Проведемо дослідження однорідності розподілів попарно між фрагментами для 2-х, 4-х та 8-ми бітового розбиттів перевіркою статистичної гіпотези про їх однорідність за критерієм хі-квадрат (3). У табл. 2 наведено результати застосування критерію.

© Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Стяглик Н. І., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-11

Таблиця 1 – Приклад розподілів для 2-бітового розбиття

Фрагмент	Ланки для ікони 1				Ланки для ікони 2			
	00	01	10	11	00	01	10	11
1	468	21	22	189	459	47	25	169
2	213	101	236	150	175	102	263	160
…	…	…	…	…	…	…	…	…
256	357	90	58	195	351	62	64	223

Таблиця 2 – Число неоднорідних розподілів за критерієм хі-квадрат

	Число бітів блочного розбиття		
	2	4	8
Число фрагментів із значущою неоднорідністю розподілів (на рівні 0,05)	167 із 256 (64,45%)	109 із 128 (85,16%)	64 із 64 (100%)

Підвищення рівня розрізнення об'єктів за рахунок подовження фрагментів у ланцюжковій структурі демонструє також розрахунок α-розходження Рен'ї (при α=0,5) між розподілами відповідно до виразу (5). У табл. 3 представлено діапазони значень міри релевантності, звідки бачимо суттєве зростання показника при збільшенні кількості бітів у фрагменті.

Таблиця 3 – Значення α-розходження Рен'ї (α=0,5) в залежності від числа бітів у фрагментах

Значення α-розходження Рен'ї	Число бітів блочного розбиття		
	2	4	8
Мінімальне	0,00008	0,00397	0,05111
Максимальне	0,02112	0,03248	0,18575

Продовжимо статистичний аналіз рівня відмінностей образів, виходячи із нормованих розподілів, і обчислимо для кожного розподілу фрагмента математичне сподівання, знижуючи тим самим розмірність структури опису. Наприклад, у випадку 2-бітового розбиття маємо статистичні розподіли для першого фрагмента 1-го і 2-го об'єктів відповідно (0,669; 0,030; 0,031; 0,270) і (0,656; 0,067; 0,036; 0,241) із математичними сподіваннями $M_1^{(1)} = 1{,}903$, $M_2^{(1)} = 1{,}862$. При цьому статистичні подання (2) перетворюються на послідовності із 256-ти елементів:

$$M^{(1)} = (1{,}903; 2{,}461; ...; 2{,}130),$$

$$M^{(2)} = (1{,}862; 2{,}583; ...; 2{,}227) \qquad (12)$$

Дослідження на однорідність отриманих у такий спосіб узагальнених описів об'єктів на основі критерію знаків приводить до висновку про їх значущу відмінність (на рівні 0,05) при різних довжинах фрагментів. У табл. 4 наведено результати застосування критерію.

У межах останнього підходу з використанням послідовностей вигляду (9), складених із математичних сподівань кодів фрагментів, виконано попарне порівняння $M_j^{(1)}$ і $M_j^{(2)}$ послідовно для j, j=1,…,m, із використанням z-критерію. Розрахунок емпіричного значення критерію для фрагмента з номером j=1,…,m здійснювався за формулою (11), критичне значення критерію на рівні значущості 0,05 становить 1,64 [14]. Наприклад, для послідовностей (12) значення $M_1^{(1)} = 1{,}903$, $M_1^{(2)} = 1{,}862$ значущо не відрізняються, а значення $M_2^{(1)} = 2{,}461$, $M_2^{(2)} = 2{,}583$ є значущо відмінними (на рівні 0,05). У табл. 5 зведено основні результати застосування критерію.

Таблиця 4 – Результати застосування критерію знаків

Кількість бітів у фрагменті	Кількість типових зсувів	Кількість нетипових зсувів	Критичне значення (рівень значущості 0,05)	Висновок щодо значущості
2	197	59	87	Значуща (59 < 87)
4	100	27	41	Значуща (27 < 41)
8	48	16	17	Значуща (16 < 17)

Таблиця 5 – Кількість значущих відмінностей за z-критерієм

	Число бітів блочного розбиття		
	2	4	8
Число фрагментів із значущими відмінностями (на рівні 0,05)	148 із 256 (57,81 %)	84 із 128 (65,63 %)	44 із 64 (68,75 %)

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Ключовим наслідком статті є підтвердження того факту, що вживання традиційних статистичних критеріїв хі-квадрат, критерію знаків, z-критерію для аналізу емпіричних даних за зіставленням розподілів структурних описів зображень дає можливість визначити добротність та прикладну ефективність побудованого простору ознак задля розрізнення візуальних об'єктів при їх розпізнаванні у системах комп'ютерного зору. Впровадження моделі блочного подання та статистичного аналізу для значень дескрипторів ключових точок зображень сприяє підвищенню ефективності процесу розпізнавання об'єктів, що підтверджується покращенням рівня розрізнення при збільшенні розміру фрагменту у побудованій ланцюжковій структурі опису.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Як бачимо за результатами аналізу табл. 2, неоднорідність розподілів стає більш вираженою при зростанні розміру фрагмента.

Дані табл. 3 демонструють суттєве підвищення якості розрізнення двох різних об'єктів. Так, наприклад, найменше з можливих значень міри подібності при 8-бітовому типі розбиття на фрагменти (0,05111) перевищує найбільше з можливих значень міри подібності при 4-бітовому типі розбиття (0,03248).

© Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Стяглик Н. І., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-11

Аналіз табл. 4 показує, що для різної кількості бітів у фрагменті спостерігається наявність значущої статистичної відмінності між описами двох об'єктів, візуально досить схожих між собою, що в черговий раз підтверджує доцільність ідеї щодо блочного подання даних дескрипторів ключових точок їх зображення. Зауважимо, що, як видно із табл. 4, навіть зменшення довжин послідовностей вигляду (9) при відповідному збільшенні довжини фрагментів демонструє значущу відмінність цих послідовностей, що, в свою чергу, є підтвердженням розрізненості досліджуваних об'єктів.

Як видно із табл. 5, розрахунки за z-критерієм є ще одним свідченням щодо встановлення значимих відмінностей об'єктів, які реально є різними, а якість розрізнення зростає при збільшенні параметра кількості бітів у фрагменті.

ВИСНОВКИ

Вживання класичних статистичних критеріїв для аналізу емпіричних даних у вигляді структурних описів зображень дає можливість під різними кутами зору визначити добротність побудованого простору ознак задля розрізнення візуальних об'єктів при їх розпізнаванні у системах комп'ютерного зору. Впровадження моделі блочного подання та статистичного аналізу для дескрипторів ключових ознак сприяє підвищенню ефективності процесу розпізнавання об'єктів, що підтверджується покращенням рівня розрізнення при зростанні розміру фрагменту у ланцюжковій структурі опису.

Застосування різноманіття статистичних критеріїв дало ідентичні висновки про значущість відмінностей описів візуальних об'єктів, що підкреслює об'єктивність проведеного дослідження.

Наукову новизну дослідження складає удосконалення та статистичне обґрунтування моделей прийняття класифікаційних рішень на основі обчислення релевантності описів об'єктів із блочним поданням дескрипторів ключових точок зображень.

Практична значущість роботи полягає у підтвердженні доцільності запровадження блочної структури для дескрипторного опису об'єкта як ефективного підходу для вирішення задач розпізнавання на прикладах зображень у системах комп'ютерного зору.

Перспективи дослідження пов'язані із застосуванням інтелектуальних процедур класифікації на підставі рішень системи блоків оброблюваних даних структурних описів. Іншим напрямком може бути впровадження апарату інтелектуального аналізу задля виявлення прихованих закономірностей чи знань у наявних описах візуальних об'єктів.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках держбюджетної НДР Харківського національного університету радіоелектроніки «Розробка гібридних систем і методів обчислювального інтелекту для обробки потоків нечіткої інформації в умовах нестаціонарності та невизначеності» (номер держ. реєстрації 0116U002539).

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Гороховатский В. А. Структурный анализ и интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении / В. А. Гороховатский. – Х. : Компания СМИТ, 2014. – 316 с.
2. Гороховатский В. А. Структурное распознавание изображений с применением моделей интеллектуальной обработки и самоорганизации признаков / В. А. Гороховатский, А. В. Гороховатский, А. Е. Берестовский // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2016. – №3 (38). – С. 39–46.
3. Gorokhovatsky V. O. Efficient Estimation of Visual Object Relevance during Recognition through their Vector Descriptions / V. O. Gorokhovatsky // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – № 75 (14). – P. 1271–1283. DOI: 10.1615/TelecomradeEng.v75.i14.40.
4. Gorokhovatsky V. O. Determination of Relevance of Visual Object Images by Application of Statistical Analysis of Regarding Fragment Representation of their Descriptions / V. O. Gorokhovatsky, S. V. Gadetska // Telecommunications and Radio Engineering. – 2019. – № 78 (3). – P. 211–220. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i3.20.
5. Leutenegger S. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints / S. Leutenegger, M. Chli, R. Y. Siegwart // Computer Vision (ICCV). – 2011. – P. 2548–2555. DOI: 10.1109 / ICCV.2011.6126542.
6. Гороховатський В. О. Статистичні розподіли та ланцюжкове подання даних при визначенні релевантності структурних описів візуальних об'єктів / В. О. Гороховатський, С. В. Гадецька, Р. П. Пономаренко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2018. – № 6 (52). – С. 87–92. DOI: 10.26906/SUNZ.2018.6.087.
7. Gadetska S. V. Statistical Measures for Computation of the Image Relevance of Visual Objects in the Structural Image Classification Methods / S. V. Gadetska, V. O. Gorokhovatsky // Telecommunications and Radio Engineering. – 2018. – Vol. 77 (12). – P. 1041–1053. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i12.30.
8. Gorokhovatskyi V. Classification of Images of Visual Objects Based on Statistical Relevance Measures of Their Structural Descriptions / V. Gorokhovatskyi, S. Gadetska // Proc. the IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT'2018), September 11–14, 2018. – P. 68–71. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526727.
9. Porter F. Testing Consistency of Two Histograms. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/1917663_Testing_Consistency_of_Two_Histograms.
10. Renyi A. On measures of entropy and information. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://l.academicdirect.org/Horticulture/GAs/Refs/Renyi_1961.pdf.
11. Alfred O. Alpha-Divergence for Classification, Indexing and Retrieval. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pdfs.semanticscholar.org/c5fd/0dbd41a6b1ed8d78d595ad02fcabd44666cc.pdf?_ga=2.24150137.2123089777.1551138070-1581667237.1550924667.
12. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов / К. Фукунага. – М. : Наука, 1979. – 367 с.

© Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Стяглик Н. І., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-11

13. Вадзинский Р. Статистические вычисления в среде EXCEL. Библиотека пользователя / Р. Вадзинский. – СПб. : Питер, 2008. – 608 с.
14. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высш. шк, 2004. – 479 с.
15. OpenCV Open Source Computer Vision.[Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docs.opencv.org/master/index.html.

Received 02.02.2019.
Accepted 18.03.2019.

УДК 004.932.2:004.93’1

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДЕЛИ БЛОЧНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДЛЯ МНОЖЕСТВА ДЕСКРИПТОРОВ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК ИЗОБРАЖЕНИЙ

Гороховатский В. А. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информатики, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Гадецкая С. В. – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой информационных технологий, Харьковский образовательно-научный институт государственного высшего учебного заведения «Университет банковского дела», Харьков, Украина.

Стяглик Н. И. – канд. пед. наук, доцент кафедры информационных технологий, Харьковский образовательно-научный институт государственного высшего учебного заведения «Университет банковского дела», Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Многомерная природа обрабатываемых данных в современных системах компьютерного зрения требует новых подходов к построению результативных пространств признаков, упрощающих обработку за счет обобщения имеющейся информации. Структурные методы распознавания изображений используют описания визуальных объектов в виде наборов дескрипторов ключевых точек как множества числовых векторов высокой размерности. Основным инструментом снижения размерности выступает представление данных в виде системы их блоков и статистическое исследование таких структур данных, которое в аспекте распознавания должно отображать обобщенные свойства объекта как совокупности его фрагментов. В связи с этим возникает проблема изучения особенностей прикладного применения и характеристик модели блочного представления в аспекте ее использования для определения релевантности описаний и классификации данных в пределах базы эталонных изображений.

Цель работы. Осуществление статистического оценивания значимости принятия классификационных решений на основе вычисления релевантности описаний объектов для модели блочного представления данных дескрипторов ключевых точек изображений.

Метод. Предложены способы различения описаний на основе модели блочного представления данных дескрипторов ключевых точек изображений с использованием критериев математической статистики и инструментария теории информации.

Результаты. Главным результатом статьи является подтверждение того, что употребление классических статистических критериев для анализа эмпирических данных в виде структурных описаний изображений дает возможность определить качество построенного пространства признаков, достаточное для различения визуальных объектов при их распознавании в системах компьютерного зрения. Внедрение модели блочного представления и статистического анализа для значений дескрипторов ключевых признаков изображений способствует повышению эффективности процесса распознавания визуальных объектов, что подтверждается улучшением уровня различия при увеличении размера фрагмента в построенной цепной структуре описания.

Выводы. Применение многообразия статистических критериев дало идентичный вывод о значимости различий эмпирических описаний визуальных объектов в построенном пространстве признаков, что подчеркивает объективность проведенного исследования. Внедренная модель блочного представления данных сохраняет различающие свойства структурного описания с эффектом существенного улучшения быстродействия принятия классификационного решения.

Научную новизну исследования составляет усовершенствование и статистическое обоснование моделей принятия решения по распознаванию визуальных объектов на основе вычисления релевантности их описаний относительно эталонов с использованием блочного представления дескрипторов ключевых точек изображений.

Практическая значимость работы заключается в подтверждении целесообразности введения блочной структуры для дескрипторного описания объекта как эффективного подхода к решению задачи распознавания на примерах изображений для внедрения в системах компьютерного зрения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: компьютерное зрение, структурное распознавания изображений, множество ключевых точек, дескрипторы BRISK, релевантность описаний, блочное представление, статистическое распределение, критерий хи-квадрат, расхождение Реньи, критерий знаков, значимость различия описаний.

UDC 004.932.2:004.93’1

THE STUDY OF STATISTICAL PROPERTIES OF THE MODEL BLOCK REPRESENTATION FOR SET OF DESCRIPTORS OF KEY POINTS OF IMAGES

Gorokhovatsky V. A. – Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Computer Science, National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

Gadetska S. V. – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies, Kharkiv Educational and Scientific Institute of SHEI “Banking University”, Kharkiv, Ukraine.

Stiahlyk N. I. – PhD, Associate Professor of the Department of Information Technologies, Kharkiv Educational and Scientific Institute of SHEI “Banking University”, Kharkiv, Ukraine.

© Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Стяглик Н. І., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-11

ABSTRACT

Context. The multidimensional nature of the processed data in modern computer vision systems requires new approaches to the construction of effective feature spaces that simplify processing by summarizing the available information. Structural methods of image recognition use descriptions of visual objects in the form of sets of key point descriptors as sets of numerical vectors of high dimension. The main tool for reducing the dimension is the presentation of data in the form of a system of their blocks and a statistical study of such data structures, which in terms of recognition should display the generalized properties of an object as a set of its fragments. In this connection, there is problem of studying the features of the applied application and the characteristics of the block representation model in the aspect of its use to determine the relevance of descriptions and classify data within the base of reference images.

Objective. Perform statistical estimation of the importance of making classification decisions on the basis of the calculation of the relevance of object descriptions for the model of block representation of descriptors of key points of images.

Method. Methods are proposed for distinguishing descriptions based on the application of the block representation model of the data descriptors of key points of images using the criteria of mathematical statistics and information theory tools.

Results. The main result of the article is the confirmation that the use of classical statistical criteria for analyzing empirical data in the form of structural descriptions of images makes it possible to determine the quality factor of the constructed feature space for distinguishing visual objects when they are recognized in computer vision systems. The introduction of the block representation model and statistical analysis for the values of descriptors of key features of images contributes to the efficiency of the process of recognizing visual objects, which is confirmed by the improvement in the level of difference by increasing the fragment size in the constructed description chain structure.

Conclusions. The use of a variety of statistical criteria gave an identical effect on the significance of the differences in the empirical descriptions of visual objects in the constructed feature space, which underlines the objectivity of the study. The implemented model of block representation of data retains the distinguishing properties of a structural description with the effect of a significant improvement in the speed of classification decision making.

The scientific novelty of the study is the improvement and statistical substantiation of models for making decisions about the class of visual objects based on the calculation of the relevance of their descriptions with references using a block representation of descriptors of key points of images.

The practical significance of the work is confirming the advisability of introducing a block structure for the block description of an object as an effective approach to solving the problem of recognition with examples of images for implementation in computer vision systems.

KEYWORDS: computer vision, structural image recognition, multiple key points, BRISK descriptors, descriptive relevance, block representation, statistical distribution, chi-square test, Renyi divergence, sign criterion, significance of the difference of descriptions.

REFERENCES

1. Gorohovatskij V. A. Strukturnyj analiz i intellektual'naja obrabotka dannyh v komp'juternom zrenii. Harkiv, Kompanija SMIT, 2014, 316 p.
2. Gorohovatskij V. A. Gorohovatskij A. V., Berestovskij A. E. Strukturnoe raspoznavanie izobrazhenij s primeneniem modelej intellektual'noj obrabotki i samoorganizacii priznakov, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 3 (38), pp. 39–46.
3. Gorokhovatsky V.A. Efficient Estimation of Visual Object Relevance during Recognition through their Vector Descriptions, *Telecommunications and Radio Engineering*. 2016, Vol. 75, No 14. pp. 1271–1283.
4. Gorokhovatsky V. O. and Gadetska, S. V., Determination of Relevance of Visual Object Images by Application of Statistical Analysis of Regarding Fragment Representation of their Descriptions, *Telecommunications and Radio Engineering,* 2019, 78 (3), pp. 211–220.
5. Stefan Leutenegger, Margarita Chli, Roland Y. Siegwart. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Key-points, 2011, Computer Vision (ICCV), pp. 2548–2555,
6. Gorohovats'kyj V. O., Gadec'ka S. V., Ponomarenko R. P. Statystychni rozpodily ta lancjuzhkove podannja danyh pry vyznachenni relevantnosti strukturnyh opysiv vizual'nyh ob'jektiv, *Systemy upravlinnja, navigacii' ta zv'jazku*, 2018. No. 6 (52), pp. 87–92. DOI: 10.26906/SUNZ.2018.6.087
7. Gadetska S. V., Gorokhovatsky V. O. Statistical Measures for Computation of the Image Relevance of Visual Objects in the Structural Image Classification Methods, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2018, Vol. 77 (12), pp. 1041–1053.
8. Gorokhovatskyi V. Classification of Images of Visual Objects Based on Statistical Relevance Measures of Their Structural Descriptions, *Proc. the IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT2018), 11–14 September 2018.* Lviv, Ukraine, pp. 68–71.
9. Porter F. Testing Consistency of Two Histograms. [Electronic resource]. Access mode: https://www.researchgate.net/publication/1917663_Testing_Consistency_of_Two_Histograms.
10. Renyi A. On measures of entropy and information. [Electronic resource]. Access mode: http://l.academicdirect.org/Horticulture/GAs/Refs/Renyi_1961.pdf.
11. Alfred O. Hero, Bing Ma, Olivier Michel, John Gorman. Alpha-Divergence for Classification, Indexing and Retrieval. [Electronic resource]. Access mode: https://pdfs.semanticscholar.org/c5fd/0dbd41a6b1ed8d78d595ad02fcabd44666cc.pdf?_ga=2.24150137.2123089777.1551138070-1581667237.1550924667.
12. Fukunaga K. Vvedenie v statisticheskuju teoriju raspoznavanija obrazov. Moscow, Nauka, 1979, 367 p.
13. Vadzinskij R. Statisticheskie vychislenija v srede EXCEL. Biblioteka pol'zovatelja. SPb, Piter, 2008, 608 p.
14. Gmurman V. E. Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika. Moscow, Vyssh. shk, 2004, 479 p.
15. OpenCV Open Source Computer Vision. [Electronic resource]. Access mode: https://docs.opencv.org/master/index.html

© Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Стяглик Н. І., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-11

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

UDC 004.93

SCOPING ADVERSARIAL ATTACK FOR IMPROVING ITS QUALITY

Khabarlak K. S. – Student of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Koriashkina L. S. – PhD, Associate Professor of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The subject of this paper is adversarial attacks, their types, reasons for the emergence. A simplified fast and effective logistic regression attack algorithm has been presented. The work's relevance is explained by the fact that neural network's critical vulnerability the so-called adversarial examples is yet to be deeply explored. By exploiting such a mechanism, it is possible to get a deliberate result from it breaking defenses of neural-network-based safety systems.

Objective. The purpose of the work is to develop algorithms for different kinds of attacks of a trained neural network with respect to preliminary the network's weights analysis, to estimate attacked image quality loss, to perform a comparison of the developed algorithms and other adversarial attacks of a similar type.

Method. A fast and fairly efficient attack algorithm that can use either whole image or its certain regions is presented. Using the SSIM image structural similarity metric, an analysis of the algorithm and its modifications was carried out, as well as a comparison with previous methods using gradient for the attack.

Results. Simplified targeted and non-targeted attack algorithms have been built for a single-layer neural network trained to perform handwritten digit classification on the MNIST dataset. A visual and semantic interpretation of weights as pixel "importance" for recognizing an image as one class or another is given. Based on structural image similarity index SSIM an image quality loss analysis has been performed for images attacked by the proposed algorithms on the whole test dataset. Such an analysis has revealed the classes the most vulnerable to an adversarial attack as well as images, whose class can be changed by adding noise imperceptible by a human being.

Adversarial examples built with the developed algorithm has been transferred to a 5-layered network of an unknown architecture. In many cases images that were difficult to attack for the original network have seen a higher transfer rates, then the ones needed only minor image changes.

Conclusions. Adversarial examples built upon the adversarial attack scoping idea and the methodic of the input data analysis can be easily generalized to other image recognition problems which makes it applicable to a wide range of practical tasks. This way, another way of analyzing neural network safety (logistic regression included) against input data attacks is presented.

KEYWORDS: adversarial attacks, fast adversarial attack algorithm, logistic regression, neural network vulnerabilities.

ABBREVIATIONS

FGSM Fast Gradient Sign Method;

L-BFGS Limited-memory BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) algorithm;

MAE Mean Absolute Error;

MNIST Modified National Institute of Standards and Technology;

PSNR Peak Signal-to-Noise Ratio;

RP2 Robust Physical Perturbations;

Softmax Softened (via exponent) max function.

SSIM Structural Similarity Index;

NOMENCLATURE

b – biases vector;

I – feature space dimensionality, neuron count in the network's input layer;

image – source image;

K – number of classes, neuron count in the output layer;

M – training batch size, used to define number of images used in a single optimization method step during training;

max_*steps* – number of attack steps;

min_*difference* – minimal difference between classes' weights allowed for a pixel attack;

S – source class;

source_weights – trained network's weight matrix for a class predicted by the neural network for the source image;

step – value, which defines pixel brightness change on a given iteration;

T – target class (desired result);

target_weights – trained network weight matrix for the target classification class;

W – network's weight matrix;

x – network's input vector, image pixel brightness vector;

y – unit vector, which defines object attribution to one class or another;

z – network's output vector;

$\hat{z}$ – desired (target) neural network's output;

α – algorithm parameter;

$\sigma_k(\cdot)$ – output layer's k^{th} neuron softmax activation function, which computes layer output by its input.

INTRODUCTION

An increasing number of tasks is being solved with neural-network-based solutions. Neural networks have reached the dominant position in image recognition since 2012, when in ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge AlexNet has got first place with a large margin [1]. A growing need of analyzing neural networks and their vulnerabilities arises with a more prominent use in security, video surveillance systems, self-driving cars and robots.

Pretrained neural networks are being used by many companies to reach their goals. A set of security vulnerabilities is disclosed due to a wide spread of neural networks with similar architecture that are trained on

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

publicly available datasets. Given a slight modification of an input data small enough to be imperceptible by a human being it is possible to make the neural network misclassify the data or even output some specific class. These are known as non-targeted and targeted adversarial attacks respectively.

By exploring trained neural network attack algorithms, understanding attack preconditions and structural image changes caused by it, it will be possible to make neural networks more efficient and robust to the input data perturbations.

In most cases the process of neural network inference can be treated as a black box even though its architecture and training dataset is known, giving a clear interpretation of underlying weights is a difficult problem. Lately a range of research papers with an attempt to track and formalize network inference model through its input data and with the use of optimization and statistics theories has been published (i.e. [2–4]). Despite that fact, development of the toolchain for understanding and diagnosing machine learning is still a prioritized research problem.

The object of study is the neural network attack process.

The subject of study is the types of adversarial attacks, consequences caused by them and possible reasons of their existence.

The purpose of the work is to: 1) develop different attack algorithms on a single-layer trained neural network given the results of a preliminary analysis of the network's weights; 2) estimation of image quality loss after the modification; 3) comparison of the attack results conducted by the developed algorithms with different adversarial attack types that were previously published in the research papers.

1 PROBLEM STATEMENT

Given a training set

$$X = \left\{ x^{(j)}, y^{(j)} \right\}_{j=1}^{J} : \; x^{(j)} \in R^I; \;\; y^{(j)} \in R^K,$$

$$y_k^{(j)} = 0 \vee 1 \; \forall j, \sum_{k=1}^{K} y_k^{(j)} = 1 \; \forall j .$$

1. Find a weight matrix $W : [I \times K]$ and a vector $b = (b_1, b_2, ..., b_K)$, which minimize function

$$G(W,b) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \gamma(W,b; z^{(m)}, y^{(m)}) =$$

$$= -\frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \sum_{k=1}^{K} y_k^{(m)} \log\left(\sigma_k \left(x^{(m)} \cdot W + b \right) \right),$$

where

$$\gamma(W,b; z, y) = -\sum_{k=1}^{K} y_k \log(z_k),$$

$$z = \sigma(x \cdot W + b),$$

$$\sigma(z) = (\sigma_1(z), \sigma_2(z), ..., \sigma_K(z)), \; \sigma_k(z) = e^{z_k} \Big/ \sum_{j=1}^{K} e^{z_j} .$$

2. Find such a perturbation $\Delta x \in R^I$, which for a given value $T \in \{1, 2, ..., K\}$ and deliberately chosen x, such that $z_S = \max\limits_{k=1,K} z_k$, $S \neq T$,

$$\hat{z}_T = \max_{k=1,K} \hat{z}_k ,$$

where $\hat{z} = \sigma((x + \Delta x) \cdot W + b)$.

3. Find such a perturbation $\Delta x \in R^I$, which for a deliberately chosen x, such that $z_S = \max\limits_{k=1,K} z_k$, $l \in \{1, 2, ..., K\}$ can be found that meets a condition of $\hat{z}_l > \hat{z}_S$.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The term "Adversarial attack" has been first introduced in the work [3], where it has been shown how with a minor change of an image's pixels leads to a misclassification during neural network inference procedure. What makes the problem more severe is that in many cases these changes cannot be observed by a human. As it has been shown by the authors, such a perturbation is not a random network's training issue. The very same modified image can be transferred with a success to a different network trained on a different but a similar dataset. To archive that goal a Box-constrained L-BFGS algorithm has been introduced. Another algorithm FGSM (Fast Gradient Step Method) has been developed as an enhancement, where a first-order approximation of the loss function is used to generate adversarial examples [6]. I-FGM is an iterative algorithm that builds on top of the ideas introduced previously and uses gradient of the loss function. These algorithms have a simpler interpretation and are faster to perform the attack. In 2017 an international neural network defense and attack competition has been held by the Google Brain team. The competition's winners have developed an algorithm to attack neural networks with a known architecture. As it has been shown, the generated images have been able not only to mislead the target network, but also other networks trained on other datasets of a similar kind or networks with another architecture. In all the cases attacks were performed on a bitmap to retain the perturbations untouched.

A lot of modern computer vision systems that are being used in security critical domains use deep neural networks behind the scenes. That's why many of the research papers target a scenario of a real-world attack. As such, paper [9] offers a road sign attack algorithm RP2. By placing stickers and drawing graffiti on the real signs, it has been made possible to force the network to misclassify "Stop" sign as a "Speed limitation". Moreover, the perturbations have been shown to be robust to the angle and distance change to a camera.

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

Other algorithms of generating reliable physical adversarial perturbations are shown in papers [10, 11 and others].

An efficient black box attack algorithm ZOO has been presented in the paper [12]. This type of an attack can be conducted without any knowledge of the neural network inner workings, the only requirement is to have access to its inference engine: one should be able to send input data and get back class probability distribution. A method of stochastic coordinate descent has been used to optimize the target function. The coordinate to be updated next is chosen by utilizing computed gradient and hessian. Gradient components are calculated with a finite difference method. To further optimize the speed, attack is performed in a hierarchical method, where small scaled images are attacked first and get enlarged over time.

An algorithm to generate efficient targeted adversarial images using optimization methods has been proposed in [13] (C&W attack).

Implementations of the described algorithms as well as some other can be found in an opensource library cleverhans[14].

Different contemporary methods of generating adversarial examples in the field of deep learning were explored and summarized in [15]. Where classification of attacks by characteristics, target goal and features has been presented. A vast review of a research held in the field of machine learning attacks, analysis of the adversarial example precursors and defense methods against them was done in [16].

An attempt to build simplified yet efficient adversarial attack methods on a logistic regression trained on the MNIST dataset has been made in this work. We are exploring two types of white box attacks (based on an assumption of full network weights and architecture knowledge): targeted and non-targeted. Such a choice has been motivated by the following factors:

1) a simplicity of a network's configuration and interpretability of its weights as of an importance of image pixels towards recognizing a picture as a sample of this or that class;

2) an ability of adversarial examples to efficiently highjack neural networks different to the one for which they were generated (as noted in [17]).

3 MATERIALS AND METHODS

The MNIST dataset will be used for the neural network training. Among its advantages is a small size and ability to make accurate predictions even using simple neural networks. The dataset consists of handwritten digits 0–9 of size 28×28. Each digit is a normalized grayscale image. The training subset consists of 60.000 examples, the testing subset 10.000. Both contain samples of digits handwritten by distinct people. Let's unroll images into single-dimensional vector and assume each pixel to be a separate input feature. As a prepossessing step the pixel intensities are normalized into [0, 1] range, which is done by dividing its values by 255 (0 stands for black pixels, 1 for the white ones).

A single-layer neural network is built with an input layer of $I=784$ neurons (by the number of pixels in the unrolled image) and $K=10$ in the output layer (by the number of classes).

Should be noted that during mathematical neural network training problem statement *soft*max activation function was not chosen at random. As is known, *softmax* serves a goal of transforming an arbitrary real-valued vector into a probability distribution of the inferred classed. For example, a network can identify a picture as 8 with a probability 0.9 and as 6 with a likelihood of 0.1. Considering such a "probabilistic" classification during neural network training, cross-entropy loss $\gamma(W,b;z,y)$ has been selected as an error metric between computed outputs y and desired z.

By performing gradient descent for minimizing $G(W,b)$ function, in 12 epochs (roughly 40 seconds worth of training time) an accuracy score of 97.0% and 92.7% on training and test sets has been achieved.

As it has been noted above, the logistic regression's key advantage, which will be used further down to build an attack algorithm, is interpretability of a weight matrix W_{ik} as of an importance or a contribution of i^{th} image pixel towards k^{th} class classification. Precisely, if $W_{ik}>0$, it is expected that an increase of pixel brightness by a some $\delta>0$ will lead to a higher confidence towards classifying an image as an example of k^{th} class, and if the weight $W_{ik}<0$ its decrease will lead to a decay of the probability.

Representation of all inferred classes in a form of a pixel importance map towards classifying each image as an instance of i^{th} class is shown on Fig. 1.

The presented illustrations can be thought of as some generic neural network digit representation.

As shown by the detailed weight matrix analysis: if its element W_{ik} has a large enough positive value (relatively to other matrix elements), then i^{th} image pixel "whiteness" is important for classification of a digit as an instance of k^{th} class; in the opposite case, when W_{ik} is large enough by modulo, but is negative, then black regions are important for k^{th} class. W_{ik} that is close to zero means that color of that pixel has no importance for classification towards k^{th} class. Following the above-described logic, we can use an element-wise multiplication to get pixels equally important for an image classification as of an instance of both classes and element-wise subtraction to get regions whose pixel brightness is more important for one class than the other. Fig. 2 has an example of an element-wise multiplication for digits 0 and 8, where light regions are equally important for both classes.

The result of a subtraction $W_{i8}-W_{i0}, \forall i$ is shown on Fig. 3. It is easily seen that in this case light tones signify pixel importance for classifying 8, the dark ones for classifying 0.

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

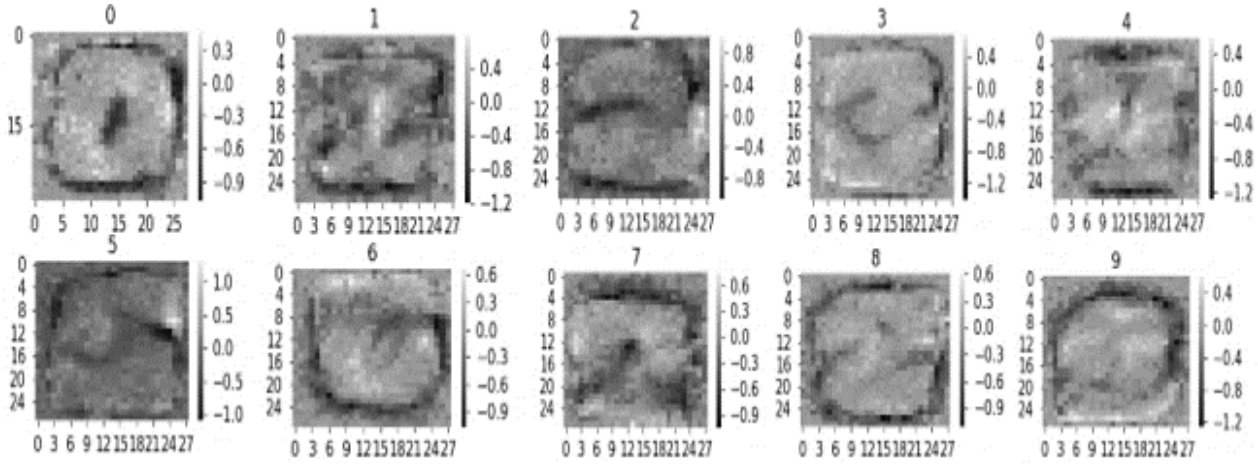


Figure 1 – Image pixel weights for each dataset digit

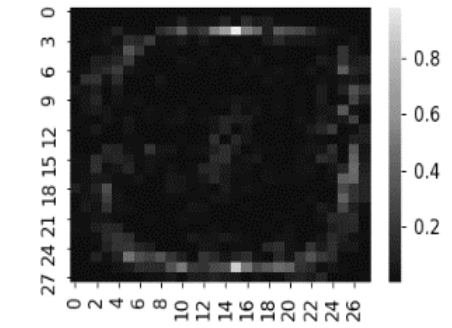


Figure 2 – Element-wise product $W_{i0} \cdot W_{i8}$

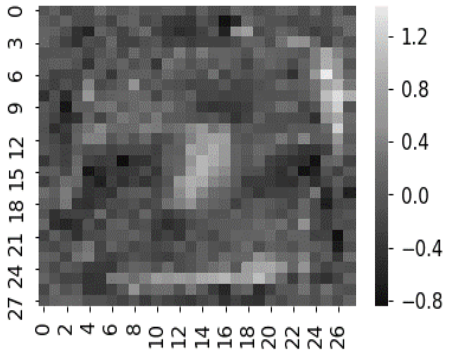


Figure 3 – Pixel importance difference for classes 8 and 0

Similar products and subtractions can be obtained for all pairs of classified examples.

Obviously, subtraction matrices are more significant for performing a targeted attack. By increasing pixel brightness in regions with a large difference (light regions on the figure), one can increase probability of classification of an image as of an instance of the subtrahend and decrease as of an example of the minuend.

To estimate image quality loss L_∞-norm has been used in [8], that is the largest deviation of a pixel brightness over entire image. For images, whose pixel values are bound in the range $[0, 255]$ deviations up to 15 points were permitted. However, such a metric allows to generate nearly unrecognizable (when compared to the source) images, which is not something we are up to. So, a metric that is highly correlated with a human perception is needed. The best results can be obtained by using one of the following metrics: MAE (Mean Absolute Error), PSNR (Peak Signal to Noise Ratio), SSIM (Structural Similarity Index). The first two are easy to compute and are frequent to be used, but they do not take human vision features into account. SSIM metrics has been introduced as an improvement on top of MAE and PSNR and is tuned to match human visual perception system as it is shown in [18]. SSIM metric values lie in range $[-1,1]$. The maximum value signifies that images are identical. This is the metrics that is to be used for an algorithm's quality estimation.

Let's denote neural network attack problem statement. The output is presented as a probability distribution of handwritten digit classes z. Consider that the network predicts image as an instance of class $S \in \{0,1,2,...,9\}$ if $z_S = \max\limits_{k=1,K} z_k$. By changing some pixels' brightness, we want to change neural network prediction to $T \in \{0,1,2,...,9\}, T \neq S$, i.e. $\hat{z}_T = \max\limits_{k=1,K} \hat{z}_k$, $\hat{z} = \sigma((x + \Delta x) \cdot W + b)$. In so doing, we enforce image correctness by clamping brightness values into a range $x_i \in [0,1],\ i = \overline{1,784}$.

Single algorithm step pseudocode:

attack_step (*image*, source_weights, target_weights,
$\alpha \in \{0; 0.5; 1\}$, $min_difference > 0$,
$step > 0$)

for each point *i* in the *image*
find corresponding weights W_S and W_T in weight matrices for source *S* and target *T* classes
let $delta = \alpha W_T - (1 - \alpha) W_S$
if $|delta| > min_difference$, then
$x = x + step \cdot delta$
if $x<0$, then $x=0$
if $x>0$, then $x=1$.

Where *image* is an image obtained on the previous algorithm step or the source one if this is the first

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

algorithm step; *source_weights* is the trained network weight matrix for original image label; *target_weights* is the trained network weight matrix for a class, towards which we want to change the prediction; *min_difference* is the minimal difference between classes' weight matrices for a pixel to be an attack target; step signifies pixel brightness change on the current iteration; $\alpha \in \{0; 0.5; 1\}$ defines an algorithm modification.

Note, that together with α, *step* and *min_difference*, the number of algorithm steps *max_steps* could also be treated as algorithm parameter. Recommended values for the described parameter values are to follow.

As it was remarked above, by the constraints on the target class j, adversarial attacks are divided into two subtypes:

– if the goal is to assign to an image class j instead of class k, then such an attack is called targeted. This type of attack can be accomplished via the described algorithm with $\alpha = 0.5$ or α=1. With that, it is said that the algorithm has succeeded to attack an image only if the algorithm has been able to change neural network's predicted class into digit j in a finite number of steps, and has failed in all other cases;

– if the goal is to reassign classification of an image of a class k, to any different one $j \neq k$, then the attack is called non-targeted. The algorithm parameter $\alpha = 0$ can be used to perform such an attack. The result is a success if an incorrect classification has been achieved in a finite number of steps.

4 EXPERIMENTS

By using the developed algorithm, an attack $0 \rightarrow 8$ is performed with a goal to force a neural network to misclassify 0 as 8. A generalized pixel importance matrix is used for that (Fig. 3). Adversarial attack results are shown on Fig. 4. Algorithm parameters: $\alpha = 0.5$, *min_difference* = 0.0, *step* = 0.01, *max_steps*=10. As is seen, the attack has succeeded: the digit has been classified as 8 with a probability 44%, in the meantime the source and modified images are virtually the same, which is approved by the SSIM metrics value 0.934.

It should be considered, that if all image pixels are being attacked by bearing in mind only the sign of the attack difference (as it is done in [6]), then the attack will still be successful. However, in such a case image noise can be viewed easily. Moreover, for an attacked image that is classified as 8 with a probability 0.396, SSIM metric value drops down to 0.892, which is significantly lower.

Let's visualize influence of *min_difference* attack parameter onto the attack result. The algorithm step has been increased for the effect to be more pronounced. In our case 99% of pixel weights lie in range [−1;1], so the difference by modulo is within [0;2], that's the range for the *min_difference* parameter. Fig. 5 has the results of targeted attack $0 \rightarrow 8$ displayed with algorithm parameters: $\alpha = 0.5$, *min_difference* = 1.2, *step* = 0.1, *max_steps* = 10. As it turns out, it has been enough to modify pixel brightness of only 4 source image points for the attack to succeed. SSIM value of 0.954 has been achieved on the 8th algorithm step. Experiments akin to the one presented above have been performed on a set of images and all with a success. However, it has been noted, that an algorithm has an interesting feature, where in some cases it leads the attack not directly to the target clas For example, for the targeted attack 6 into 1 during the first algorithm steps we have 6 misclassified as 2. In a case when such an intermediate class appears during the attack, perceptual image quality is degraded (for the example above we got SSIM = 0.635).

The problem's roots have been investigated by utilizing PCA (Principal Component Analysis). It has been noticed after having visualized scatted plot for points of classes 2, 6 and 1, that intercluster difference for digits 2 and 6 is a lot lower that the one for 6 and 1. And as is shown on fig. 6 (for α=0.5), the difference vector between the target and source classes passes through the field of twos.s, but through some intermediate instead.

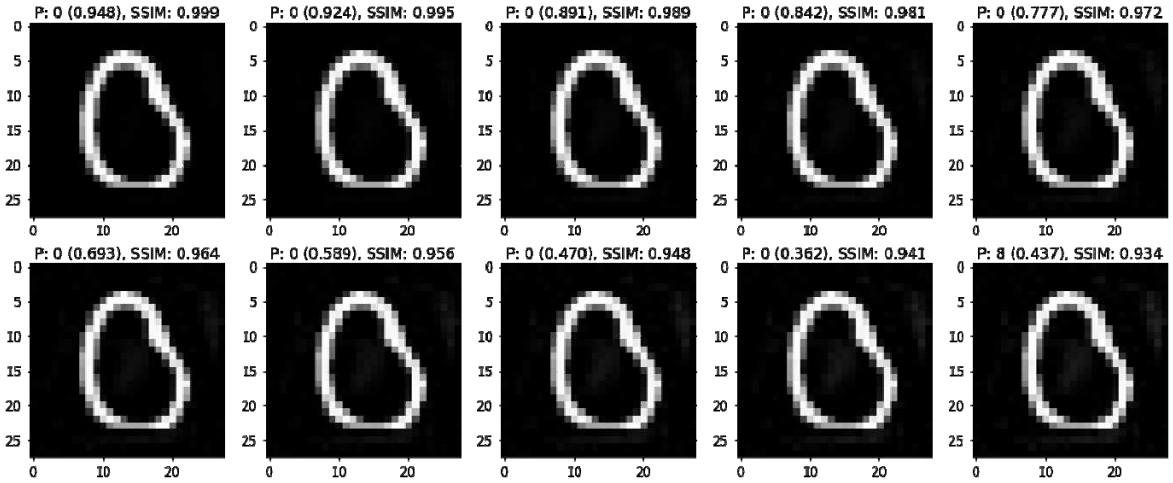


Figure 4 – $0 \rightarrow 8$ attack. Algorithm parameters: *min_difference* = 0.0, *step* = 0.01, max_*steps* = 10

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

While performing targeted attack such issues can be avoided by using another algorithm modification with parameter α=1. Thus, by applying such a modification on the one hand, for a targeted attack we will strive to maximize output of the target neuron when compared to others. On the other hand, we will minimize source neuron output in respect to other ones to accomplish non-targeted attack, which can be achieved with an additional algorithm modification with $\alpha = 0$.

Much better modified image quality can be obtained by the virtue of such algorithm modifications (for example, for the same $6 \rightarrow 1$ attack SSIM score has risen to 0.780). Fig. 6 has trajectories of the source image 6 while being a subject to modification by the original algorithm and both its variations (targeted and non-targeted).

5 RESULTS

Generalized attack analysis was performed next. By launching targeted attack for each pair of source and target classes, a success rate heatmap has been drawn (Fig. 7). Source classes are shown on the left, the target ones in the bottom.

Heatmap elements are SSIM values averaged across all the attacks for a given source, target pair. Mean quality over the whole test dataset is 0.76 – such images after attack will still be correctly classified by a human. Top score has been achieved for an attack of similar digits i.e.: $8 \rightarrow 9$, $9 \rightarrow 8$, $0 \rightarrow 8$, $3 \rightarrow 8$. The worst quality degradation was for attack $1 \rightarrow 0$. This can be explained by the fact that the vital region for zero is a black hole in the middle, which gets usually overlapped by a white bar of a one digit. Should be noted, that $0 \rightarrow 1$ attack requires much fewer image modifications then the one into opposite direction, which is proved by comparing SSIM metric value (higher by 0.21). As attacks have been built on real test set samples opposed to the generic digit silhouettes which got learnt by the neural network, the heatmap SSIM values lack symmetry. Training set quality loss heatmap has a similar feature in it.

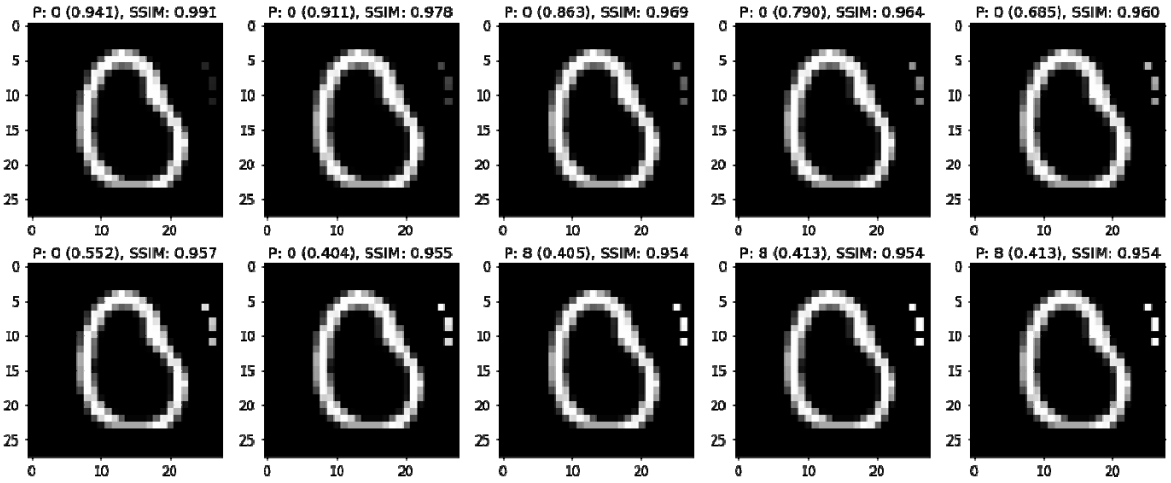


Figure 5 – $0 \rightarrow 8$ attack**.** Algorithm parameters: *min_difference* = 1.2, *step* = 0.1, *max_steps* = 10

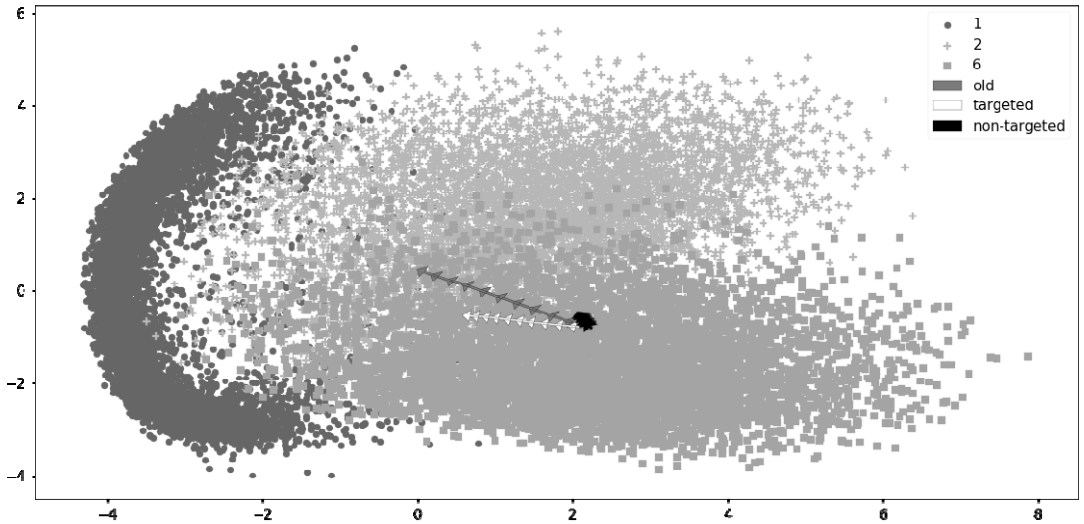


Figure 6 – $6 \rightarrow 1$ attack trajectory as projected onto a surface using PCA: targeted attack with $\alpha = 0.5$ (the longest trajectory), targeted with α=1 (route of an average length), non-targeted with $\alpha = 0$ (the shortest path)

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

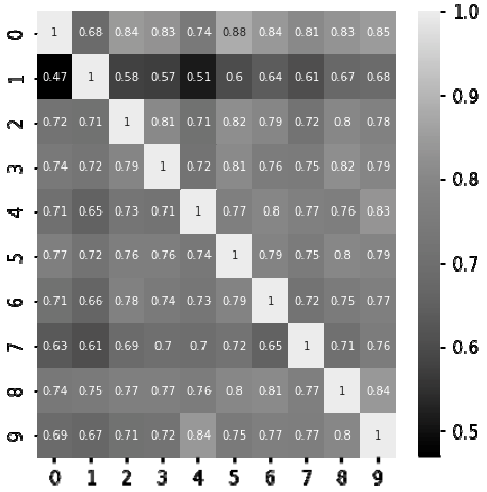


Figure 7 – SSIM metric values heatmap for each source, target attack pair

Lower average image quality loss can be attained by employing a stricter parameter selection algorithm. While fig. 7 has losses computed for a low empirically chosen *min_difference*=0.5 value, by selecting the best value from range [0.5, 1.2] an increase of SSIM to 0.87 score has been observed.

A higher average SSIM score 0.93 has been reached for the non-targeted attack case, which means that source and target images are nearly impossible to distinguish with a naked eye. As previously, digits 0, 8, were the best ones to attack, 1 has proved to be the most problematic (see the boxplot on Fig. 8). By analyzing non-targeted attack results, one can come up to a conclusion that if image quality loss deviation is high for different images of a certain class (i.e. some images are easy to attack, while others not), then algorithm is inefficient (as it can only change digits that look similar to several classes); if, conversely, the deviation is small, then the algorithm is efficient.

SSIM plots with respect to min_*difference* parameter value have allowed to make a conclusion about the fact that each class has a tendency of an image quality rise jointly with min_*difference* increase up to 0.9 point, such a trend is especially noticeable for the class of nines. Specifically, the human perceived image quality loss will be substantially lower in case of a strong change of several pixels, then when all image points are slightly modified. Taking this feature into account is the thing that makes our algorithm standout among all other known in literature methods.

Among the fast gradient methods, the most efficient algorithm is I-FGM with L_2 norm loss [7]. An attack for each source, target pair has been conducted by following the above described procedure for the case without *min_difference* selection. Algorithm has been successful on all test images but has achieved a lower SSIM score of 0.83.

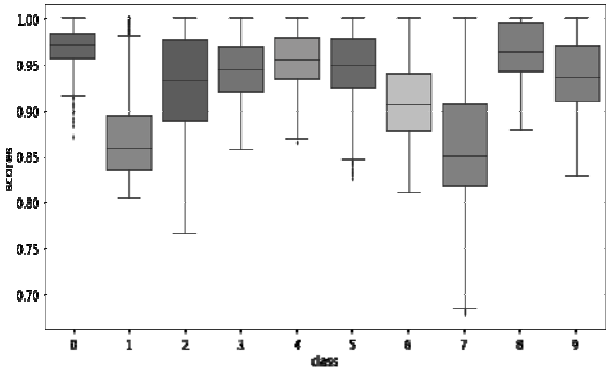


Figure 8 – Low non-targeted attack SSIM score deviation. Algorithm is good at attacking diverse images of a single class

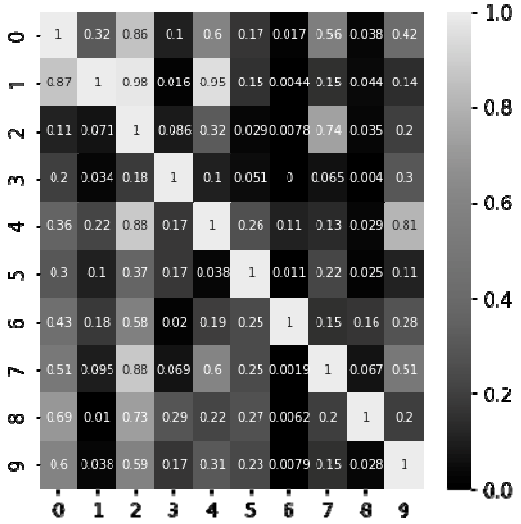


Figure 9 – Single-layer to 5 layer fully connected network transfer success probability heatmap

Lastly, the question of adversarial image transfer has been considered. This way, we want to perform the so-called black box attack, when we don't have any knowledge about network's weights or architecture, the only allowed operation is to query neural network prediction engine by submitting some images. The attack will be performed by using the above described logistic regression architecture, then an attempt to transfer each image to a 5-layered unknown neural network will be made.

For the results reproducibility neural network architecture is to follow, yet this knowledge has not been used in any way during the attack phase. The neural network has a 5-layer fully-connected architecture with layer sizes of 200, 100, 60, 30, i.e. 4 hidden, one output with 10 neurons and one input with 784. As a mean of regularizing the network Batch Normalization has been applied after the first layer, Dropout after the second one. ReLU has been used as an activation function for all layers but the last one, where we have switched to a Softmax function instead. After 100 epochs of training

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

using Adam optimization algorithm, training set accuracy has reached 98.65%, the test one 98.51%.

Figure 9 has a generalized heatmap representation of an attack transfer success probabilities. By the above-described procedure an average probability of 33% successfully transferred images has been achieved. Interesting to note, that in many cases images that were difficult to attack for the original network have seen a higher transfer rates than the ones needed only minor image changes. For instance, it has been possible to successfully transfer 87% of $1 \rightarrow 0$ attack images, which have been one of the most challenging ones, but only 14% $9 \rightarrow 7$ attack images.

Let's follow along the $4 \rightarrow 9$ attack procedure. Each step will have the predicted digit with its probability shown for the attacked single-layer classifier (SL) and 5-layer fully-connected network (FC5) (Fig. 10). It should be observed that after there were enough changes to cheat the original network, it has been necessary to make 4 more steps to deceive the 5-layer one. This means that while the two networks have a similar decision boundary yet each one has it biased with respect to another one.

Considering the above-described thoughts, a generalized targeted attack with neural network transfer has been conducted once again. This way, after having performed a successful attack on the source network, 5 more algorithm steps were made (where number 5 was chosen empirically), which makes it possible to transfer 91% of adversarial images with a minimal image quality loss.

6 DISCUSSION

Hence, another way of analyzing neural network safety has been presented (logistic regression in particular) against input data attacks. Simplified targeted and non-targeted logistic regression attack algorithms for handwritten digit classification problem on the MNIST dataset has been built. A visual "importance" interpretation of each image pixel for its classification as of an instance of a class has been given. An analysis has been performed that has permitted to define classes the most vulnerable to the attack as well as images for which class predicted by the neural network can be changed unnoticeably for a human being. The proposed algorithm gives a possibility of conducting a successful adversarial attack by modifying only several image pixels which minimizes image data loss.

The analysis of image quality loss performed based on Structural Image Similarity Index (SSIM) for targeted and non-targeted neural network attacks for the proposed algorithm shows that the developed algorithm provides a better image quality of the attack in comparison to other gradient methods.

Adversarial examples, built with the developed algorithm, have been successfully transferred to a different neural network with 5 layers of an unknown architecture. High change of adversarial image transfer to a network with a vastly different network architecture makes the algorithm applicable for attacking restricted-access systems.

CONCLUSIONS

A logistic regression adversarial attack algorithm for the MNIST dataset handwritten digit classification task has been proposed. Targeted and non-targeted neural network attacks can be performed by utilizing one of the two algorithm modifications. The relevance is explained by the fact of an increasing growth of neural network use in the field of public safety and of a critical need of exploring neural network attack methods and of their precursors.

The scientific novelty of obtained results is that for the first time adversarial attack algorithm has been built upon the attack scoping idea. The presented fast and efficient attack algorithm is able to attack both the whole image as well as separate image regions, which makes the attack algorithm more flexible. An image information loss can be minimized by modifying only a couple of pixels.

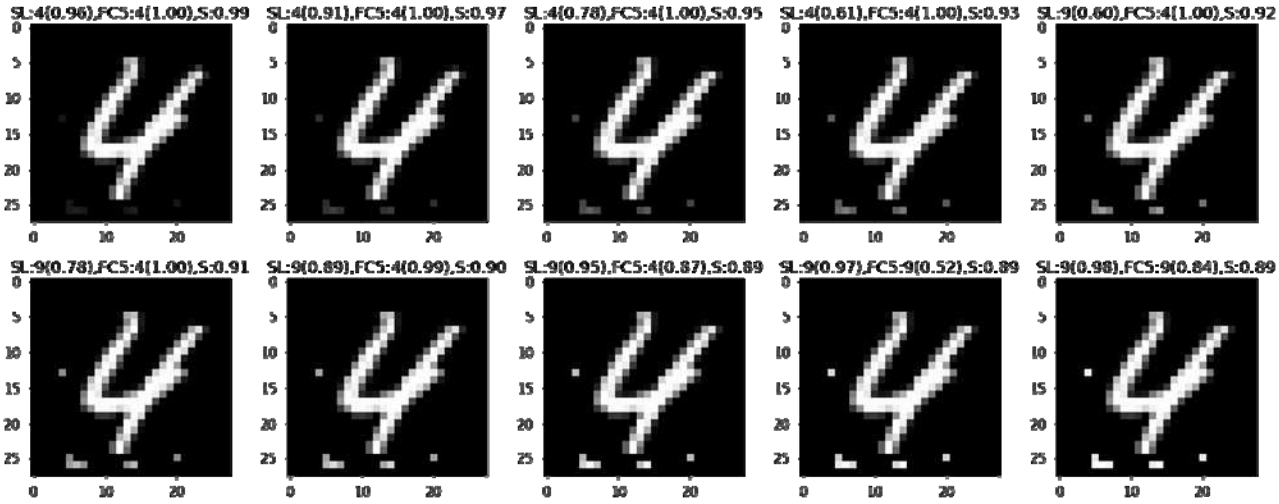


Figure 10 – $4 \rightarrow 9$ attack**.** Adversarial image transfer to a fully-connected 5-layer network. Algorithm parameters: min_*difference* = 0.45, *step* = 0.2, max_*steps* = 10

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

The practical significance of obtained results is that an early neural network vulnerability diagnostic can be performed by utilizing the proposed algorithms and image quality loss analysis system, which is a pivotal point towards a safer practical neural network use.

Prospects for further research are to study physical neural network adversarial attack transfer with the use of an ordinary pen, based on a pixel importance of the selected class.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Data Analysis and Artificial Intelligence of the National Research University "High School of Economics" Gromov Vasilii Aleksandrovich for support and a fruitful paper discussion.

REFERENCES

1. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks, *Advances in Neural Information Processing Systems 25: 26th Annual Conference on Neural Information Processing Systems : 3–6 December 2012: proceedings, Lake Tahoe.* Nevada, USA, NIPS, 2012, pp. 1106–1114. DOI:10.1145/3065386
2. Pang Wei Koh, Percy Liang Understanding Black-box Predictions via Influence Functions [Electronic resource]. Access mode: http://arXiv:1703.04730.
3. Szegedy C., Zaremba W., Sutskever I. et al. Intriguing properties of neural networks [Electronic resource]. Access mode: http://arXiv:1312.6199.
4. Zeiler M. D., Fergus Rob eds.: Fleet D., Pajdla T., Schiele B., Tuytelaars T. Computer Vision Visualizing and Understanding Convolutional Networks – ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham, 2014, Part 1, Vol 8689, pp. 818–833. DOI:10.1007/978-3-319-10590-1_53
5. LeCun Y. Corinna Cortes, Christopher J. C. Burges. The MNIST database of handwritten digits [Electronic resource]. Access mode: http://yann.lecun.com/exdb/mnist/.
6. Goodfellow Ian J., Shlens J., Szegedy C. Explaining and Harnessing Adversarial Examples [Electronic resource]. Access mode: http://arXiv:1412.6572.
7. Kurakin A., Goodfellow Ian J., Bengio S. Adversarial machine learning at scale [Electronic resource]. Access mode: http://arXiv preprint arXiv:1611.01236.
8. Dong Y., Liao F., Pang T. et al. Boosting adversarial attacks with momentum. [Electronic resource]. Access mode: http://arXiv:1710.06081.
9. Eykholt K., Evtimov I., Fernandes E. et al. Robust Physical-World Attacks on Deep Learning Models. [Electronic resource]. Access mode: http://arXiv preprint arXiv:1707.08945v5.
10. Kurakin A., Goodfellow I., Bengio S. Adversarial examples in the physical world [Electronic resource]. Access mode: http://arXiv preprint arXiv:1607.02533.
11. Sharif M., Bhagavatula S., Bauer L., Reiter M. K. Accessorize to a crime: Real and stealthy attacks on state-of the-art face recognition, *Computer and Communications Security: ACM SIGSAC Conference, Vienna, Austria,* 24–28 October 2016, proceedings. ACM, 2016, pp. 1528–1540. DOI: 10.1145/2976749.2978392
12. Chen Pin-Yu, Huan Zhang, Yash Sharma et al. ZOO: Zeroth Order Optimization based Black-box Attacks to Deep Neural Networks without Training Substitute Models, *Artificial Intelligence and Security: the 10th ACM Workshop AISec'17, Dallas, TX, USA, 30 October – 03 November 2017: proceedings. ACM New York, NY, USA, 2017*, pp. 15–26. DOI: 10.1145/3128572.3140448
13. Carlini N., Wagner D. Towards evaluating the robustness of neural networks [Electronic resource], Access mode: http://arXiv:1608.04644 [cs.CR].
14. Papernot N., Faghri F., Carlini N. et al. Technical Report on the CleverHans v2.1.0 Adversarial Examples Library [Electronic resource]. Access mode: http://arxiv.org/abs/1610.00768.
15. Xiaoyong Yuan, Pan He, Qile Zhu et al. Adversarial Examples: Attacks and Defenses for Deep Learning [Electronic resource]. Access mode: http://arXiv:1712.07107v2 [cs.LG].
16. Naveed Akhtar, Ajmal Mian. Threat of Adversarial Attacks on Deep Learning in Computer Vision: A Survey [Electronic resource]. Access mode: http://arXiv:1801.00553 [cs.CV].
17. Papernot N., McDaniel P., and Goodfellow I. Transferability in machine learning: from phenomena to black-box attacks using adversarial samples [Electronic resource]. Access mode: http://arXiv preprint arXiv:1605.07277.
18. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error measurement to structural similarity, *IEEE Trans. Image Process,* 2004, Vol. 13, No. 4, pp. 600–612. DOI: 10.1109/tip.2003.819861

Received 02.11.2018.
Accepted 16.01.2019.

УДК 004.93

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗМАГАЛЬНОЇ АТАКИ ШЛЯХОМ УТОЧНЕННЯ ЇЇ ОБЛАСТІ

Хабарлак К. С. – магістр кафедри системного аналізу і управління Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Україна.

Коряшкіна Л. С. – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри системного аналізу і управління Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Предметом дослідження даної роботи є змагальні атаки, види, причини виникнення, а також алгоритми атак. Представлений швидкий спрощений і більш ефективний (порівняно з існуючими аналогами) алгоритм атаки на модель логістичної регресії. Актуальність роботи пояснюється малою дослідженістю критичної уразливості нейронних мереж – так званих змагальних прикладів, які дозволяють зламувати механізм передбачення і отримувати довільний результат, роблячи системи безпеки, засновані на нейронних мережах, малоефективними.

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

Мета. Розробка алгоритмів різних типів атаки на навчену одношарову нейронну мережу з урахуванням результатів попереднього аналізу параметрів самої мережі, а також оцінка втрат якості зображень, що були піддані модифікації, порівняння результатів проведення атак за допомогою розроблених алгоритмів і змагальних атак подібного роду.

Методи. На основі результатів аналізу матриць ваг навченої нейронної мережі сформульована ідея побудови алгоритмів атаки на нейронну мережу, виділяючи для атаки певні області на зображенні з урахуванням різниці вагових матриць цільового і вихідного класів. Представлений швидкий і досить ефективний алгоритм атаки, який здатний використовувати для атаки як все зображення повністю, так і окремі його регіони, що робить алгоритм більш гнучким. Використовуючи метрику структурної схожості зображень SSIM, проведений аналіз алгоритму і його модифікацій, а також порівняння його з попередніми методами, які використовують для атаки звичайний градієнт.

Результати. Побудовано спрощені алгоритми націленої і ненаціленої атак на одношарову нейронну мережу, яка застосовується для класифікації рукописних цифр з набору даних MNIST. Дана візуальна і змістовна інтерпретація налаштованих ваг мережі як «важливостей» точок зображення для розпізнавання його як представника того чи іншого класу. На основі порівняння структурної схожості зображень алгоритмом SSIM був проведений аналіз втрат якості зображень для задач націленої і ненаціленої атак наведеними спрощеними алгоритмами на всій тестової вибірці. Подібний аналіз дозволив визначити класи, що найбільш піддаються атакам, а також зображення, для яких клас, передбачений нейронною мережею, може бути змінений непомітно для людини.

Змагальні приклади, побудовані за допомогою розробленого в статті алгоритму, перенесені на мережу з 5-ю шарами невідомої архітектури. У ряді випадків зображення для класів, які було складно атакувати для вихідної мережі, вдалося перенести з більшим успіхом, ніж ті, для зміни класу яких було досить мінімальних змін.

Висновки. Побудовані на основі ідеї обмеження області атаки змагальні приклади, а також система (методика) аналізу вхідних даних легко узагальнюється і на інші задачі розпізнавання, що робить представлену методику придатною для аналізу ряду практичних задач. Отже, представлений ще один підхід до аналізу безпеки нейронних мереж (зокрема, логістичної регресії) проти атак на вхідні дані.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: змагальні атаки, швидкий алгоритм змагальної атаки, логістична регресія, уразливість нейронних мереж.

УДК 004.93

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ АТАКИ ПУТЕМ УТОЧНЕНИЕ ЕЕ ОБЛАСТИ

Хабарлак К. С. – магистр кафедры системного анализа и управления Национального ТУ «Днепровская политехника», Украина.

Коряшкина Л. С. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры системного анализа и управления Национального ТУ «Днепровская политехника», Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Предметом исследования данной работы являются состязательные атаки, виды, причины возникновения, а также алгоритмы атак. Представлен быстрый упрощенный и более эффективный (по сравнению с существующими аналогами) алгоритм атаки на модель логистической регрессии. Актуальность работы объясняется малой исследованностью критической уязвимости нейронных сетей – так называемых состязательных примеров, которые позволяют взламывать механизм предсказания и получать произвольный результат, делая системы безопасности, основанные на нейронных сетях, малоэффективными.

Цель. Цель данной работы – разработка алгоритмов разных типов атаки на обученную однослойную нейронную сеть с учетом результатов предварительного анализа параметров самой сети, а также оценка потерь качества изображений, подвергнутых модификации, сравнение результатов проведения атак с помощью разработанных алгоритмов и состязательных атак подобного рода.

Методы. На основе результатов анализа матриц весов обученной нейронной сети сформулирована идея построения алгоритмов атаки на нейронную сеть, выделяя для атаки определенные области на изображении с учетом разности матрицы весов целевого и исходного классов. Представлен быстрый и достаточно эффективный алгоритм атаки, который способен использовать для атаки как все изображение, так и отдельные его регионы, что делает алгоритм более гибким. Используя метрику структурной похожести изображений SSIM, был проведен анализ алгоритма и его модификаций, а также сравнение его с предыдущими методами, использующими для атаки обычный градиент.

Результаты. Построены упрощенные алгоритмы нацеленной и ненацеленной атак на однослойную нейронную сеть, которая применяется для задачи классификации рукописных цифр из набора данных MNIST. Дана визуальная и содержательная интерпретация настроенных весов сети как «важностей» точек изображения для распознавания его как представителя того или иного класса. На основе сравнения структурной похожести изображений алгоритмом SSIM был проведен анализ потерь качества изображений для задач нацеленной и ненацеленной атак приведенными упрощенными алгоритмами на нейронные сети на всей тестовой выборке. Подобный анализ позволил определить классы, наиболее подверженные атаке, а также изображения, для которых класс, предсказанный нейронной сетью, может быть изменен незаметно для человека.

Состязательные примеры, построенные с помощью разработанного в статье алгоритма, перенесены на сеть с 5-ю слоями неизвестной архитектуры. В ряде случаев изображения для классов, которые было сложно атаковать для исходной сети, удалось перенести с большим успехом, чем те, для изменения класса которых было достаточно минимальных изменений.

Выводы. Состязательные примеры, построенные на основе идеи ограничения области атаки, а также методику анализа входных данных легко обобщается и на другие задачи распознавания, что делает ее применимой для анализа ряда

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

практических задач. Таким образом, представлен еще один подход к анализу безопасности нейронных сетей (в частности, логистических регрессоров) против атак на входные данные.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: состязательные атаки, быстрый алгоритм состязательной атаки, логистическая регрессия, уязвимость нейронных сетей.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Krizhevsky A. ImageNet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton // Advances in Neural Information Processing Systems 25: 26th Annual Conference on Neural Information Processing Systems: 3–6 December 2012: proceedings. – Lake Tahoe, Nevada, USA: NIPS, 2012. – P. 1106–1114. DOI: 10.1145/3065386
2. Pang Wei Koh. Understanding Black-box Predictions via Influence Functions [Electronic resource] / Pang Wei Koh, Percy Liang. – Access mode: http://arXiv:1703.04730.
3. Szegedy C. Intriguing properties of neural networks [Electronic resource] / C. Szegedy, W. Zaremba, I. Sutskever et al. – Access mode: http://arXiv:1312.6199.
4. Zeiler M. D. Visualizing and Understanding Convolutional Networks / Matthew D Zeiler, Rob Fergus eds.: Fleet D., Pajdla T., Schiele B., Tuytelaars T. // Computer Vision – ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science. – Springer, Cham, 2014. – Part 1. – Vol 8689. – P. 818–833. – DOI:10.1007/978-3-319-10590-1_53
5. LeCun Y. The MNIST database of handwritten digits [Electronic resource] / Y. LeCun, Corinna Cortes, Christopher J. C. Burges. – Access mode: http://yann.lecun.com/exdb/mnist/.
6. Goodfellow Ian J. Explaining and Harnessing Adversarial Examples [Electronic resource] / Ian J Goodfellow, J. Shlens, C. Szegedy. – Access mode: http://arXiv:1412.6572.
7. Kurakin A. Adversarial machine learning at scale [Electronic resource] / A. Kurakin, Ian J. Goodfellow, S. Bengio. – Access mode: http://arXiv preprint arXiv:1611.01236.
8. Dong Y. Boosting adversarial attacks with momentum. [Electronic resource] / Y. Dong, F. Liao, T. Pang et al. – Access mode: http://arXiv:1710.06081.
9. Eykholt K. Robust Physical-World Attacks on Deep Learning Models. [Electronic resource] / K. Eykholt, I. Evtimov, E. Fernandes et al. – Access mode: http://arXiv preprint arXiv:1707.08945v5.
10. Kurakin A. Adversarial examples in the physical world [Electronic resource] / A. Kurakin, I. Goodfellow, S. Bengio. – Access mode: http://arXiv preprint arXiv:1607.02533.
11. Sharif M. Accessorize to a crime: Real and stealthy attacks on state-of the-art face recognition / M. Sharif, S. Bhagavatula, L. Bauer, M. K. Reiter // Computer and Communications Security: ACM SIGSAC Conference, Vienna, Austria, 24 –28 October 2016: proceedings. – ACM, 2016. – P. 1528–1540. DOI: 10.1145/2976749.2978392
12. Chen Pin-Yu. ZOO: Zeroth Order Optimization based Black-box Attacks to Deep Neural Networks without Training Substitute Models / Pin-Yu Chen, Huan Zhang, Yash Sharma et al. // Artificial Intelligence and Security: the 10th ACM Workshop AISec'17, Dallas, TX, USA, 30 October – 03 November 2017: proceedings. – ACM New York, NY, USA, 2017. – P. 15–26. – DOI: 10.1145/3128572.3140448
13. Carlini N. Towards evaluating the robustness of neural networks [Electronic resource] / N. Carlini, D. Wagner. – Access mode: http://arXiv:1608.04644 [cs.CR].
14. Papernot N. Technical Report on the CleverHans v2.1.0 Adversarial Examples Library [Electronic resource] / N. Papernot, F. Faghri, N. Carlini et al. – Access mode: http://arxiv.org/abs/1610.00768.
15. Xiaoyong Yuan. Adversarial Examples: Attacks and Defenses for Deep Learning [Electronic resource] / Yuan Xiaoyong, Pan He, Qile Zhu et al. – Access mode: http://arXiv:1712.07107v2 [cs.LG].
16. Naveed Akhtar. Threat of Adversarial Attacks on Deep Learning in Computer Vision: A Survey [Electronic resource] / Naveed Akhtar, Ajmal Mian. – Access mode: http://arXiv:1801.00553 [cs.CV].
17. Papernot N. Transferability in machine learning: from phenomena to black-box attacks using adversarial samples [Electronic resource] / N. Papernot, P. McDaniel, and I. Goodfellow. – Access mode: http://arXiv preprint arXiv:1605.07277.
18. Image quality assessment: From error measurement to structural similarity / [Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli] // IEEE Trans. Image Process. – 2004. – Vol. 13, No. 4. – P. 600–612. – DOI: 10.1109/tip.2003.819861

© Khabarlak K. S., Koriashkina L. S., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-12

UDC 510.6

TRAINER AND TRAINEES MODELING BASED ON COMPLEX INFORMATION APPROACH TO IMPROVEMENT OF TRAINING INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

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

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

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

ABSTRACT

Context. The problem in substantiation for methods on constructing models of trainer and trainees, taking into account the peculiarities of their information activity, is considered. The object for the study were the models of trainer and trainees as participants in information interaction.

Objective. The goal for the work is the solving of the tasks in conceptualization and formalization, aimed at modeling the trainer's subsystem in the framework of information technology for instruction, as well as modeling information flows and information procedures in the model of the trainee's subsystem.

Method. The key components of learning systems and processes are the trainer and trainees. The essential features of information interaction between the instructor and trainees are highlighted. The basis is the concept of the information flow, the specific properties of information flows that are characteristic of learning processes and important for their successful progress are identified. Methods for modeling the key components of the training system as an information system are proposed, such as: the trainer`s subsystem, considered from the point of view of the application for learning information technologies; a subsystem of the trainee, represented from the perspective of the use for information flows and information procedures.

Results. The proposed models were implemented programmatically and studied practically in the learning processes as a result of working out the modeling tasks for the trainer and trainees as participants in information interaction.

Conclusions. The conducted experiment confirmed the effectiveness and validity of the concepts and formalisms, the appropriateness for their implementation in information systems, processes and technologies of teaching with the purpose of increasing the processes efficiency on obtaining and practical implementation of information activity models for the trainer and trainees. Further development of research implies the consideration for a wider range of the information activity aspects on the educator and trainees, as well as the corresponding experimental approbations.

KEYWORDS: modeling, trainer, trainee, information, information systems, information processes, information technologies.

NOMENCLATURE

A is a memory operator;

A^{-1} is an inverse memory conversion;

A_0 is an initial nondegenerate memory operator;

$\boldsymbol{A}$ is a parameter vector with components m, s, θ;

$\boldsymbol{a_i}$ is an i-th implementation for the vector of parameters $\boldsymbol{a}$;

C is an assessment scale of learning error;

C_{ik^*} are grades obtained for educational trajectories k^* of the i-th learning stages;

C_{ki} is an estimate obtained for the κ_i-th segment on the i-th stage of the learning trajectory;

dim$X$ is a dimension for a subset of the set M at the input;

dim$Y$ is a dimension for a subset of the set M at the output;

f is a functor for the operator of signal transformations;

f^{-1} is an inverse transformation functor for f;

$f()$ is a function for the signal conversion operator;

$f^{-1}()$ is a reverse signal conversion;

grad is a gradient function designation;

$H_I()$ is an entropy associated with the information process I and the time parameter t;

$H_{t=k}()$ is an entropy of the $t=k$ cross-section for a random process describing the information flow I;

I is a designation of an information flow associated with the functional dependence $I(t)$, a flow of information from the trainer;

I_x is an input information flow;

I_{y^*} is an output information flow;

I_u is an information flow describing the model of the student's representations;

$I()$ is a functional dependence on the argument t, which determines the instantaneous value of the information flow amplitude;

$^\circ I()$ is a random component of an information process, determined by the normalized flow;

i – index variable;

i is an index variable;

k is some specific value of the time variable t in the formula for finding $M\{I\}$ in the cross-section $t=k$;

κ_i is a quantity of the i-th stage segment in the learning path;

k^*_l is the l-th partial learning path ($l = 1, 2, ..., N$);

log_a is a mathematical operation of calculating the logarithm for the base a;

M is a set of elements m_i;

$M\{\}$ is a function for determining the value of a mathematical expectation used to obtain the expected value of an information flow;

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

$M\{\}_{t=k}$ is an expectation for an information flow of the learning process as a random function of a time in the cross-section $t=k$;

$M_I()$ is an expectation function associated with the information process I and the time parameter t;

m is a number of options;

m_i is an i-th memory element;

n is a number for topics of the studied course;

N is a variable that stores the number of summable elements;

P is a probabilistic characteristic of an information flow associated with the functional dependence $P(t)$;

$P()$ is a generalized random process that describes an information flow in accordance with a given timeline as a function of the argument t;

$P_i()$ is an i-th discretization of a random process describing an information stream in accordance with a given timeline as a function of the argument t;

r is a designation of the barrier function weight;

S is a set of connections s_i;

s is some connection of memory elements;

sup is a mathematical operation of finding the exact upper bound;

s_i is an i-th relationship between memory elements;

t is a current time of the information flow passing;

U^* is a designation for the optimal control model, described through sequences of the partial trajectories;

u is an information flow while minimizing the student error;

x is an argument of the target function $f()$;

x^* is an x value corresponding to the solution of the optimization problem (the optimum point);

x^*_Φ is some optimum point $\Phi()$;

$\boldsymbol{x}()$ is some event flow vector;

$\Delta\boldsymbol{a}$ is some deviation of the vector $\boldsymbol{a}$;

ΔI is an information flow, evaluating the mutual deviation of information flows;

Θ is a set of weights θ_i;

θ is a weight (significance) of the memory component;

θ_i is some weight characterizing the i-th memory component;

$\varphi_i()$ is an i-th constraint in the optimization problem;

$\Phi()$ is some modified objective function $f()$;

Ω is a set limiting a possible values of the x^*.

INTRODUCTION

The increase in labor market requirements, objectively conditioned by the current realities of the course and the forecasted trends in the development of social and economic processes, requires an increase in the intensification of the specialists (professionals) training.

The learning processes are characterized by high information saturation and dynamism of information spaces for studied subject areas, which determines the high level in relevance and practical value for researching information aspects of learning processes, including such aspects of their study as information, information objects, information processes, information systems and information technologies.

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

Strengthen these features also such factors as increasing activity and the growing volume for information needs and information requests of participants in the learning process.

It is important to consider the information components of the learning processes within a single integrated system, based on the methodology of the system-technical approach.

No less important is also the allocation within this review of a separate, special, more thorough study of such key elements of information systems that provide the learning process, both trainer and trainees.

The object of study is a set of models for trainer and trainees, considered as participants in information interaction.

The subject of study is a set of concepts and ways for modeling the trainer and trainees, studied from the point of view of the basic components for an integrated system of information technologies in teaching.

The purpose of the work is to solve the problems of conceptualization and formalization, aimed at creating methods in modeling the trainer's subsystem in the framework of information technology for training, as well as modeling information flows and information procedures in the model of the trainee's subsystem.

1 PROBLEM STATEMENT

The theoretical and applied research conducted in the sphere of modeling systems, processes and technologies for training examined from the point of view of their informational aspects is still not fully complete, detailed and systematically covers issues related to modeling methods for key subsystems of the information system of education, in particular, information subsystems of the trainer, trainee and their dynamic components such as information flows and information procedures [1–16].

Proceeding from the above, the key task of research and development in the presented work was the creation of concepts and modeling methods for the following two basic subsystems of the information learning system: the subsystems of the instructor as a source of dynamic information flows in information technologies of instruction; the subsystem of the trainee, viewed from the point of view of the dynamic information flows and procedures in which he participates as a component of the information learning system.

When modeling the information subsystem of the trainer in the framework of the information technology for education, it was necessary to obtain: for the training information flow I as a time process $I(t)$, having probabilistic elements and considered in time sections $t=k$ – functional dependencies for the expected value $M\{I\}_{t=k}$ and the random component $^\circ I()$; structural model of the information subsystem for the trainer, taking into account the consideration of the educational system as an information technology complex with optimization management; the structural model on the dynamics of the information subsystem for the trainer as a generalized object with an inertial link of the first order; formular and

structural view of the optimization model of learning process control as a movement along information trajectories with minimization of the training error, assessed by scale C.

When modeling the student's information subsystem, from the angle of information flows and information procedures functioning in it, it was necessary to obtain in the work: classification of information flows; structural model of information flows, with the release of the types of information technologies on which it is based; the formula model for transformations of the input information flow I_x into the output information flow I_y taking into account the peculiarities of the information signal space, memory and memory operator A; the formula model for describing information in memory using direct f and inverse f^{-1} transformations of signals carrying information; the formula model of condition for the completion of training as an information process; the structural model of information flows in memory; formula models for estimating the gradient of the deviation for information flows in learning $\text{grad}\Delta I\boldsymbol{a}_i$ taking into account the information reproduction error $\Delta I(a)$, descriptions of the gradient training procedure, the optimization task of learning as an information process using the penalty and barrier function methods; the structural model of the student subsystem as an information system for optimal control of information accumulation.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Improvement of the modern education is based on the use of advanced technologies related to the categories of computer, network, information, information and communication (including distance) technologies based on advanced hardware and software means of information broadcast, and also possessing a high degree of interactivity [1–12].

Wherein, because of the possibility, the widest range of advantages and achievements in the sphere of modern information systems, processes and technologies is used [1, 4–5, 17–23].

The basis of the learning processes is the use of information, and, consequently, an important role in ensuring their effectiveness is played by the expedient use of information systems, information processes and, accordingly, information technologies.

In connection with the foregoing, high relevance and practical value have effective models and algorithms for information components of learning processes.

In this regard, the key starting point is the information flows and the corresponding dynamic information procedures in the learning processes, their interactions and models, which was reviewed by the authors in their previous publications.

In this paper, we consider the questions on modeling of the trainer (teacher) subsystem in the information technology of instruction, as well as information flows and information procedures in the model of the student's subsystem.

For definiteness of further consideration, we will adopt the most common definition of information technology [6, 17–22, 25–26], according to which, further information will be presented in Table 1.

It should be noted that information technology is based on the following basic principles: interactive (dialog) mode of operation with a computer; integration with other software products; the flexibility of the process for changing data and setting tasks.

All basic information technologies (Table 1) are used in educational processes, being their basis and the main tool.

The notion of information flow is inextricably linked with the notion of information technology [25–26].

The well-known notion of information flow, which came from logistics [25–26], is evidently inherent in any information system and information technology.

The desire to connect the notion of information flow with the information system and information technology [25–26] leads to the following definition: the information flow is considered the totality of messages circulating within the information system, as well as between this system and the environment external to it, necessary for management and control of information technology operations.

It is advisable to use the classification [25–26] of information flows (Table 2).

Table 1 – Types of information technology

Information technology classes	Content of activities, related to the implementation information technologies
Data processing	Processing according to a known, specific algorithm
Management	Ensuring the adoption of management decisions
Automated office	Organization and support of information processes
Support for decision-making	The development of a management decision that occurs as a result of an iterative process, in which a decision support system (a computational link and an object of management) and a person participate
Using of expert assessments	Based on the use of artificial intelligence, expert systems provide an opportunity to receive expert advice on any problems about which these systems have accumulated knowledge

Table 2 – Classification of information flows

Names of information flows	Content of information flows
Horizontal	Coverage of messages between partners on production relations in one level of management
Vertical	Coming from above, from the leading instances to the subordinate instances or links of the system
External	Flow in an environment external to the system
Internal	Circulate within one system
Input	Messages entering (arriving) to the system or to one of its subsystems
Output	Messages that go beyond one system or one of its subsystems

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

The method of modeling information systems is based on the following "cornerstones": the simplest property of the information flow is one-pointedness (from source to receiver); the narrowness of information interaction only the source and receiver processes; the general principle of modeling is optimality.

On the one hand, the desire to achieve the optimality of the model is considered as a tool for obtaining a valid (which corresponds to the original with the greatest possible deviation or error if possible) representation of the object and its environment, which requires special procedures for finding the appropriate conditions and constraints, and also for the dynamic step-by-step approximation of the model to the object.

On the other hand, the optimality of learning processes models involves the use of optimization procedures in order to obtain an effective representation of information processing processes.

On the third hand, it is the optimization procedures, on which progressive information technologies are based, that make it possible to realize them highly efficiently [14, 16, 24].

In all the cases presented, we have the following features: the optimality of the modeling for the information components of the training systems is closely associated with the dynamic nature of the information training procedures; the key consequence of the optimization procedures dynamism, which increasingly leads to the need for their consideration as independent dynamic objects and most clearly manifested with a decrease in the step of their sampling, are the significant time costs for optimization, related to the high complexity of the corresponding tasks on system control [14, 16, 24].

An immediate consequence of the above is the need in effective modeling of the dynamics for optimization procedures and the relevance of improving the methods for constructing these models.

It should be noted that there are certain scientific results concerning the speed of convergence for search procedures of the optimal, however, the subject area of methods for modeling optimization procedures that are considered as independent dynamic objects remains extremely inadequate [14, 16, 24].

It is important to note that the classification that was mentioned above in Table 2 is oriented to various structures that arise in the implementation of information systems, but in any case, there are unidirectional information flows, and for them the approach to structural modeling of information systems is valid.

It should also be noted that the focus on higher efficiency (productivity, effectiveness, reactivity, accuracy, etc.) of information processing processes required improved concepts for determining the amount of information, as well as performing analytical and synthetic operations for research and development of information systems in the information space [13–16, 19–22, 24–26].

Let's give a quantitative estimate for the information transmitted from the transmitter to the receiver.

The instantaneous value of the information flow amplitude, which coincides with the definition of information [14–16, 24–26], is represented by the formula (1):

$$I(t) = -\log_a P(t). \tag{1}$$

The expected value of the information flow is represented by the formula (2):

$$M\{I\} = -M\{\ \log_a P\ \}. \tag{2}$$

The aim of the research presented below is to solve the problems of conceptualization and formalization, aimed at creating methods for modeling the trainer's subsystem within the information technology of instruction, as well as modeling information flows and information procedures in the model of the trainee's subsystem.

3. MATERIALS AND METHODS

The information flow in learning is a random function of time. The mathematical expectation of the specified process in the section $t=k$ is determined by the average (on implementation) value of the information by the formula (3):

$$M\{I\}_{t=k} = -\sum_{\substack{i=1\\ t=k}}^{n} P_i(t)\log_a P_i(t) = H_{t=k}(I). \tag{3}$$

The entropy of the cross-section of the random process describing the information flow is not random, and determines the expected information for the transmitted information stream. In relation to learning, we have a planned flow of information created by the instructor.

The random component of the information process is determined by the normalized flow by the formula (4):

$$\overset{o}{I}(t) = I(t) - M_I(t) = I(t) - H_I(t). \tag{4}$$

Thus, the centered information flow, as a random process, allows you to determine the deviation of information flows, as the trainee's information flow, centered on the entropy of the trainer's flow.

In this case, it is possible to assess the deviation of the learning process from a given trajectory.

Considering the educational system as an information complex, including the trainer's subsystem and the trainee's subsystem, we note that the main properties of this complex are:

– the presence of memory, in which the transmitted information and algorithms for its transmission are stored;

– the availability of an algorithm for comparing the flow of information transmitted to the trainee's subsystem and information reproduced by the trainer;

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

– the availability of algorithms for managing the selection of information depending on the deviation of the training stream from the reproduced stream;

– the presence of an objective function or functional and algorithms for optimizing the control of the learning information flow.

In this case, the structural model takes the following form (Fig. 1).

For each block there is information technology. The memory block is supported by the information technology of the automated office, where storage, transformation and transmission of information is envisaged. The memory sampling control unit is based on information technology of expert assessments and decision support.

In its turn, the objective function adopted in the task ensures the application of information control technology.

An essential point is the presence in the structure of the trainer`s subsystem the optimization procedure, which ensures the achievement of the necessary level for the criterion of the instruction quality.

The presence of an optimization procedure in the system causes the formation of dynamic properties for the entire subsystem.

Thus, evaluating the optimization procedure as a gradient one, we obtain a model for the dynamics of the trainer`s subsystem as a generalized object with an inertial link of the first order (Fig. 2).

The trainer, having found a deviation in the pupil's presentation about the material presented, with some "dynamic" delay corrects the material presented, reducing the error of the trainee.

Therefore, by dividing the training course into topics and selecting a certain number (let's denote it by m) of variants for presentation or sequences of information blocks within each of the topics, we can represent the learning process as trajectory motion from initial state to completion of the trajectory, aiming to minimize learning error, estimated scale C.

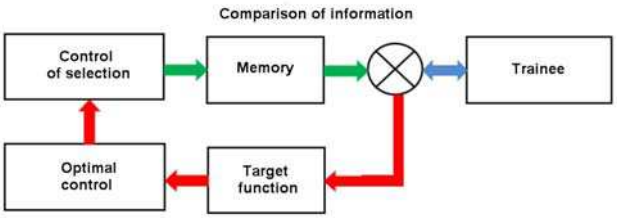


Figure 1 – The structural model for the trainer's subsystem

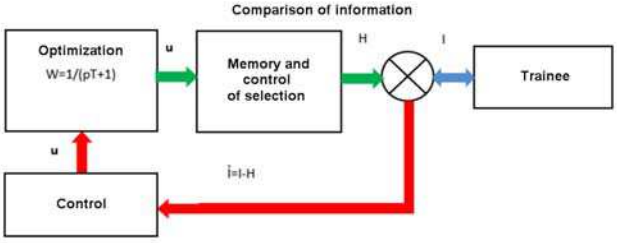


Figure 2 – Model of the trainer's subsystem

In this case, for N topics, where each i-th stage contains κ_i segments and each segment of the trajectory gives an estimate of C_{ki}, we obtain the problem of determining the optimal control as a sequence of partial trajectories, by the formula (5):

$$U^* = \{k^*_1, k^*_2, ..., k^*_N\}. \quad (5)$$

We have the task of dynamic programming, represented by the formula (6):

$$U^* \to \sup \sum_i^n C_{ik^*}. \quad (6)$$

In this way, the learning path is selected (Fig. 3).

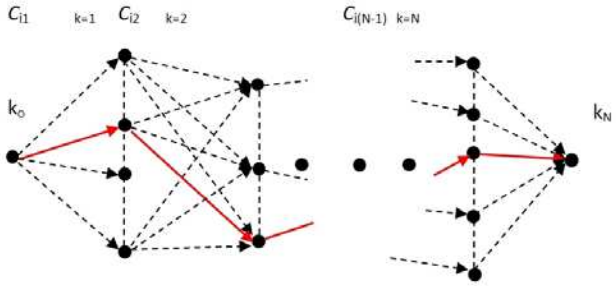


Figure 3 – Choosing the optimal trajectory of learning

The solution of this problem is determined by the Bellman principle, within the framework of the dynamic programming method ([13–16, 24] – the optimum is achieved by a search of variants with backward and forward movement).

Important is the process of changing the state of the teacher in time. The environment changes – the knowledge amount of the learner changes, the traveled trajectory of learning is accumulated. Consequently, the trainer`s subsystem is not stationary.

Compensation for degrading trends is achieved through additional training, attestation and retraining.

Consider information procedures in the model of the trainee's subsystem.

The evaluation of learning is approved for the results: the repetition of the information received from the instructor; the construction of a model adequate to the description given by the instructor. The following information flows are distinguished in the trainee's subsystem (Figure 4):

– I – information flow of the trainer;

– I_u – a flow of information describing the model constructed by the trainee, based on information stored in the trainee's memory;

– ΔI – the information flow estimating the deviation of the instructor's information and the student's presentation;

– u – the information flow created when the trainee's error is minimized.

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

The model shown in Fig. 4, relies on the information technology for decision making by the trainer and data processing when correcting the content of memory, as well as the technology for information systems control while minimizing the presentation error:

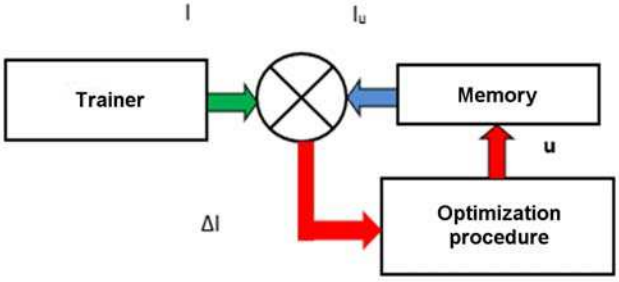


Figure 4 – Information flows in the trainee's subsystem

This view is based on the process for identifying the model of the surrounding world through training, as a correction for the contents of memory.

The gradualness of information perception observed during training is related to the dynamic properties of the algorithm for minimizing learning errors, which are individual and must be taken into account when forming the information flow of the instructor.

Despite the convenience of describing the model using the notion of information flows, it is not possible to completely ignore the signal space. Describing the memory as a set of elements $\{m_i\}$, the set of connections $\{s_i\}$, and the set of weights $\{\theta_i\}$, we can represent the memory model as a triplet of sets M, S, Θ.

The specified triple forms the memory operator A, as its subset, which ensures the transformation of the input information stream I_x into the output information stream I_y. In this case, the memory operator depends on the parameter vector $\mathbf{a}$, with the components m, s, θ, and we can write, by the formula (7):

$$A(\mathbf{a}) * I_x = I_y . \tag{7}$$

In this case, it is necessary to take into account that the incoming information flow I_x does not interact with the entire set M, but only with its subset having dimension $\dim X$.

The necessary condition for the absence of information loss during the conversion by memory is the condition of preserving the dimension $\dim X = \dim Y$.

Considering that the information flow is inextricably linked with the flow of events $\boldsymbol{x}(t)$, at the same time, that the external information flow and the information flow in memory do not need to have the same signal space, select the signal conversion operator f.

In this case, the transformation operator does not influence the information flow, that is, $f(I) = I$, but it converts the signals carrying the information.

In this case, the information inside the memory is described as follows, by the formula (8):

$$f(I) = I \quad \rightarrow \quad A(\mathbf{a}) * f(I_x) = I_y \tag{8}$$

The adopted learning paradigm requires the learner to reproduce the information received from the instructor. Therefore, it is also need to execute the reverse transformation, by the formula (9):

$$A^{-1}(\mathbf{a}) * f^{-1}(I_y) = I_x . \tag{9}$$

However, the mapping (9) does not necessarily exist, since the operator A defines a one-to-one mapping only if the information I_x (or a part of it) is already mapped in the memory.

The condition for completing the training we obtain in a simple form, by the formula (10):

$$A^{-1}(\mathbf{a}) * f^{-1}(A(\mathbf{a}) * f(I_x)) = I_x . \tag{10}$$

Assuming the linearity of the operators $f(I)$ and $f^{-1}(I)$, we can write by the formula (11):

$$f^{-1}(A(\mathbf{a}) * f(I_x)) = A(\mathbf{a}) * f^{-1} * f(I_x) . \tag{11}$$

Therefore, taking into account (11), we obtain the condition for completing the training in the form of the formula (12):

$$f * f^{-1} = 1 \quad \rightarrow \quad \left.\begin{array}{c} A^{-1}(\mathbf{a}) * A(\mathbf{a}) = 1 \\ \dim X = \dim Y \end{array}\right\} \tag{12}$$

Condition (12) says that information is assimilated if convolution of associative and direct memory results in an identity operator.

Condition (12) is only a formalization of the accepted learning paradigm, but it allows to obtain a structural model of information flows in memory, while learning (Fig. 5).

The nondegeneracy condition of the transformation, taking into account the conservation of dimension, generates a learning procedure based on the sequential determination of the vectors $\boldsymbol{a}$, which ensure the selection of a nondegenerate transformation with a sequential increase in dimension, up to a dimension that ensures the identity of the input information stream and the information flow generated by the model.

Thus, the training procedure consists of a sequence of steps to minimize the information reproduction error $\Delta I(\boldsymbol{a})$, with a consecutive increase in the dimension of the memory operator, condition (12).

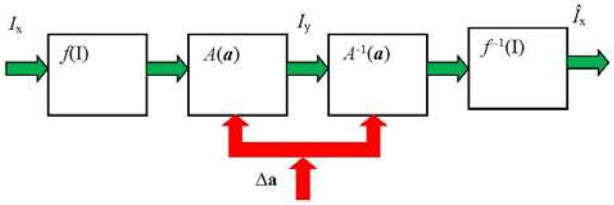


Figure 5 – Information flows in memory during training

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

Restricting ourselves to the gradient optimization procedure [13–16, 24], we obtain to estimate the gradient of the information flow deflections by the formula (13):

$$grad\Delta I_{\mathbf{a}_i} \approx \frac{\Delta I(\mathbf{a}_i + \Delta\mathbf{a}) - \Delta I(\mathbf{a}_i)}{\Delta\mathbf{a}}. \qquad (13)$$

Using gradient estimation (13), we will write the learning procedure as a gradient procedure by the formula (14):

$$\mathbf{a}_{i+1} = \mathbf{a}_i + \frac{grad\Delta I_{\mathbf{a}_i}}{\left|grad\Delta I_{\mathbf{a}_i}\right|}. \qquad (14)$$

Since for a gradient procedure the starting point of motion is essential, we define the initial non-degenerate operator A_0, formed by a subset included in the set that generates the required operator. This is the mapping of the principle from simple to complex.

As a consequence, we come to the methods of penalty and barrier functions, with the inherent dangers in the appearance of gully.

In fact, the method of barrier functions, in this case, is used to solve a problem with restrictions of the inequalities type for the dimension of the memory operator.

So, assuming the existence of an objective function $f(\boldsymbol{x})$ and the limitations $\varphi_i(\boldsymbol{x}) < 0$, i = 1, 2, …, n, an optimization problem is posed, represented by the formula (15):

$$\begin{gathered} x^* \to \min f(x), \\ x^* \in \Omega \,|\, \varphi_i(x) < 0, i = 1,2,...,m. \end{gathered} \qquad (15)$$

Within the framework of the method, a change in the goal function is provided such that when approaching the boundary, there is a “repulsion” from the barrier formed by constraints (Fig. 6).

To organize a "barrier", the restriction $\varphi_i < 0$; i = 1, 2,…, m is usually used, taking into account that the actual boundary is given by equations $\varphi_i = 0$; i = 1, 2,…, m.

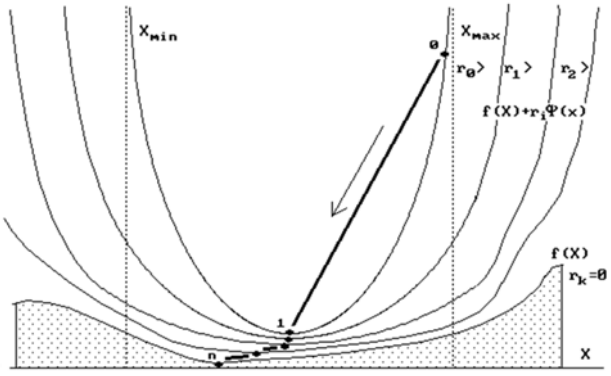


Figure 6 – Method of barrier functions

Thus, we form a new goal function by the formula (16):

$$\Phi(x) = f(x) + \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\varphi_i^2(x)}. \qquad (16)$$

and, using the gradient procedure, we solve the problem in finding the minimum of a new objective function $\Phi(\boldsymbol{x})$, we find the point of its minimum $\boldsymbol{x}_\Phi^*$, which, in general, does not coincide with the optimum point $\boldsymbol{x}^*$ because of the barrier function influence.

To eliminate the error in the $\boldsymbol{x}^*$ definition, we eliminate the influence of the barrier function by organizing a stepping procedure with decreasing barrier function weight, by the formula (17):

$$\begin{gathered} r_1 > r_2 > ... > r_k = 0, \\ \Phi_j(x) = f(x) + r_j \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\varphi_i^2(x)}, j = 1,...,k. \end{gathered} \qquad (17)$$

The number of steps for the procedure k and the sequence r_j are chosen in advance from the conditions of the problem.

Thus, a sequence of connecting the elements to the model formed in the memory is formed.

In a situation where there is no single-valued memory operator, its search can be provided using the method of penalty functions.

When solving a problem with constraints of equations type, represented by the formula (18):

$$\begin{gathered} x^* \to \min f(x), \\ x^* \in \Omega \,|\, \varphi_i(x) = 0, i = 1,2,...,m, \end{gathered} \qquad (18)$$

a similar method is used.

The difference is in the formation of the penalty function, which is assigned in such a way as to ensure the approach to the border, by the formula (19):

$$\begin{gathered} r_1 < r_2 < ... < r_k > 0, \\ \Phi_j(x) = f(x) + r_j \varphi_i^2(x), j = 1,...,k. \end{gathered} \qquad (19)$$

The disadvantage of this method is its “ravine type”, which requires the use of the steepest descent method at each of the steps.

Thus, it is possible to construct a structural model of the trainee’s subsystem as an information system for optimal control of information accumulation (Fig. 7).

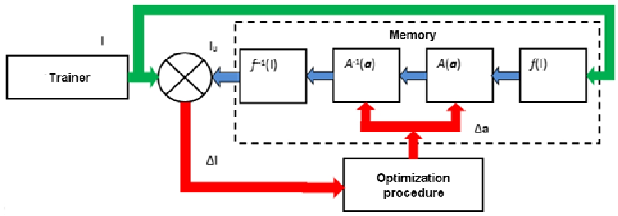


Figure 7 – Model of the trainee’s subsystem

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

We got a conception for the process of information accumulation by an information and control system with a goal functional, defined as the minimum deviation in the information flow of the trainer from the information stream being reproduced by the trainee. This model allows us to evaluate the dynamics of the process.

Based on the evaluation for the dynamics of the gradient procedure, which determines the behavior of the entire subsystem, one can construct a simple model similar to the gradient procedure model.

Assuming that the information flow of the trainer increases its intensity step by step, according to the degree in assimilation of the material, we get a simple model (Fig. 8, 9).

For clarity, we use the tools of the SIMULINK system, which allow us to obtain convenient models of system dynamics.

In Fig. 8 the information flow from the trainer *I* is modeled by a series of pulse parcels storing the input information *Ic*.

The accumulation of information by trainee *Iu* is determined taking into account the dynamics of the optimization procedure.

The transient processes in Fig. 9 illustrate the possibility of coordinating the information flow of the learner with the trainee's capabilities.

At optimum coordination, the moment of end for fragment preservation is combined with the beginning for the following fragment of a training trajectory.

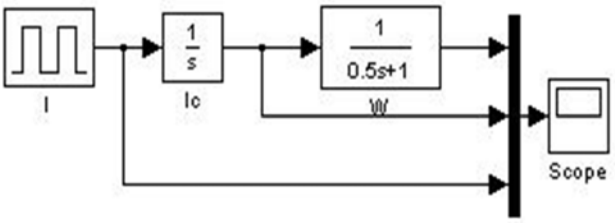


Figure 8 – Modeling the dynamics of information accumulation (scheme of the model executed in the SIMULINK system)

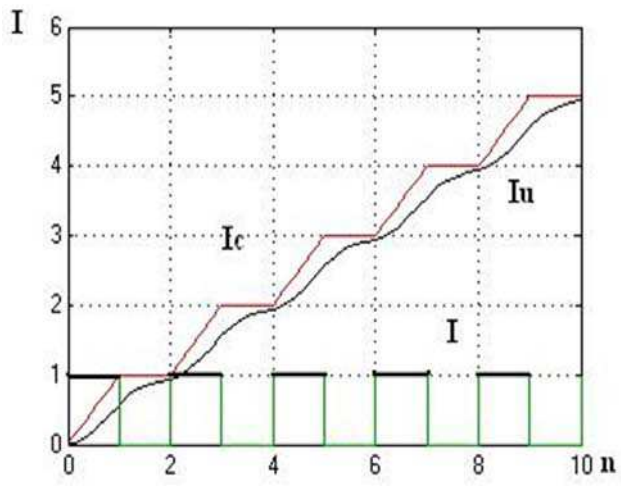


Figure 9 – Modeling the dynamics of the information accumulation (in SIMULINK system)

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

4 EXPERIMENTS

The implementation of the experiment was based on a set of programs (both standard and expanding the range of their functional capabilities of author's developments), which allowed to realize the generalized models of trainer and trainees as key subsystems of information learning systems, as well as to make their expert evaluation.

The trainer and trainees models were tested in such a way that the initial data for testing models were combined into 150 tuples of data.

Based on the experimental results, the validity estimates of the trainer and trainees models were obtained, from which it follows that the obtained and the reference values of these estimates coincide.

5 RESULTS

The following results were obtained.

1. The analysis on the development in the theory and practice of learning is carried out, the special relevance and practical value of the information approach to the modeling of learning systems is highlighted.

2. As the key objects of the study, the models for the information subsystems of trainer and trainees are considered.

3. The modeling for the trainer subsystem in the framework of the training information technology is performed.

4. The generalized methods for modeling the trainer and trainees subsystems are obtained.

The models of trainer and trainees were implemented programmatically, studied in real learning processes, and the results of these studies (in the form of generalization of demonstrative samples of experimental data, with a sample length of 150) are summarized in Table 3 and Table 4.

Table 3 shows four types of trainers, in accordance with their relative graduation in terms of professional qualifications: Type I – Doctors of Sciences, Professors; type II – Candidates of Sciences (Ph.D.), Associate Professors; type III – Seniors Lecturers; type IV – Assistants and Trainee Teachers.

The resulting data in Table 3 shows the following positive increments of the indicators: increment 1 – according to the speed of training; increment 2 – by coverage of training information; increment 3 – according to the quality of knowledge achieved by the trainees; increment 4 – integral increment (generalized for all indicators).

The demonstrative characteristics (Table 3) of the learning processes effectiveness are improved due to the introduction of the generated methods for modeling the information subsystem of the educator, including for those with a lower category of professional qualification.

Table 3 – The model of the trainer information subsystem

Type of trainers	Percentage ratio of the trainers a certain type (in the range from 0% to 100%)	The overall effectiveness in implementation of the trainer's activity before applying the proposed modeling method	Positive dynamics in the effectiveness of training activities based on the practical implementation results of the developed modeling methods:			
			increment 1	increment 2	increment 3	increment 4
Type I	10	90	6	10	8	8
Type II	30	80	4	6	5	5
Type III	30	70	3	5	4	4
Type IV	30	60	3	3	3	3
Average value	25	75	4	6	5	5

Table 4 shows six types of trainees that correlate in academic performance with the European grading scale for the EKTS grades as follows: type 1 – A; type 2 – B; type 3 – C; type 4 – D; type 5 – E; type 6 – F, FX. The results shown in Table 4 are the following increments: 1 – to reduce the duration for the implementation of information activities by the trainees in the learning process; 2 – to increase the amount of information consumed by trainees; 3 – in increasing quality assimilation of information by trainees; 4 – on the integrated indicator for the effectiveness of learning activities within the information subsystem of the trainee.

The results of the trainees activity improved for all types of research, and, especially, for the most problematic type, six where previously positive estimates were mainly obtained exclusively after a number of retakes.

The conducted experiment confirmed the effectiveness of the generalized methods for modeling information subsystems of trainer and trainees, taking into account, as an actual factor, the dynamics of information procedures in the training system.

Table 4 – The model of the trainee information subsystem

Type of trainees	Share of the trainees (in %)	The average initial success of training	Positive dynamics of learning outcomes when using the proposed modeling methods			
			increment 1	increment 2	increment 3	increment 4
Type 1	10	92	2	3	1	2
Type 2	20	86	3	5	4	4
Type 3	20	78	7	6	5	6
Type 4	20	69	9	9	6	8
Type 5	20	62	12	11	10	11
Type 6	10	40	15	14	22	17
Average value	16,6	83.5	8	8	8	8

6 DISCUSSION

The modeling methods expand and supplement the tools of modeling. As a result, it is important to note the following:

– the currently existing theoretical and practical research and development on a number of authors' collectives and individual authors mainly reflect separately taken, isolated subproblems in the methodology of modeling for dynamic information systems (objects, processes, procedures, technologies, etc.) related to teaching by trainers and assimilation by trainees, which does not allow, on the whole, to obtain a sufficiently satisfactory state of the general model;

– the methods in modeling for the information subsystems of the trainer and trainees developed by the authors of this publication expand the capabilities of previously developed by other authors methodological developments, allowing to significantly increase the effectiveness of information learning processes (according to Tables 3 and Table 4, the integral indicators of effectiveness increase by 5% and 8% respectively).

CONCLUSIONS

In paper, the results of research on the methods formation in modeling of information subsystems for the trainer and trainees, complementing and developing existing approaches were presented.

The carried out experiment substantiated the practical effectiveness of the proposed modeling methods and the expediency of using them to enhance the effectiveness of information subsystems of the trainer and trainees.

The scientific novelty of the achieved results consists in the fact that for the first time methods have been proposed for modeling the trainer subsystem within the learning information technology, as well as information flows and information procedures in the trainee's subsystem, which are based on the complex application of the information theory methodological apparatus and the conceptual basis of studying the activity processes for the trainer and trainees as integral, purposeful, dynamically proceeding information processes, which are a full-scale complex of interrelated information procedures to provide the required state for information base of trainees competencies.

The proposed methods make it possible to ensure, with an allowable accuracy, the optimal modeling for information subsystems of the trainer and trainees taking into account the dynamics factor, which makes it possible: to reduce the time intervals for the flow of information learning processes; to increase the volumes of information presented, consumed and qualitatively assimilated at the theoretical and practical level. Accordingly, a higher level of knowledge, abilities and skills of the trainees is achieved, with reception them the best points.

Within the created methods, key concepts and mathematical modeling apparatus of information subsystems for trainer and trainees are proposed.

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

The practical significance of the work results is to ensure that they increase the effectiveness of information subsystems for the trainer and trainees.

Prospects for further development of the work involve the consideration in a more wide range of the characterization aspects for the information subsystems of the trainer and trainee, as well as the results of their activities.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work, which is a logical continuation of the research, the results of which were published in [27], was carried out at the Information Technology Department of the Cybernetics and Systems Engineering Faculty in Kherson National Technical University, within the framework of a single set on research tasks for the international program "Erasmus + KA2 – Cooperation for innovation and the exchange of good practices – Capacity Building in the field of Higher Education", an international project 561728-EPP-1-2015-1-ES-EPPKA2-CBHE-JP "GameHub: University-enterprises cooperation in game industry in Ukraine", and the research project "Development of software for analysis of the organizational structure of the enterprise" with state registration PK0116U005663.

REFERENCES

1. Willcox K. E., Sarma S., Lippel P. H. Online education : a catalyst for higher education reforms. Massachusetts Institute of Technology online education policy initiative (Final Report). Cambridge: MIT, 2016, 56 p.
2. Zorn A., Haywood, J. Glachant J., Eds Higher education in the digital age. Moving academia online. Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA, Edward Edgar Elgar Publishing, 2018, 170 p.
3. Xing W., Fei G. Exploring the relationship between online discourse and commitment in Twitter professional learning communities, *Computers & Education,* 2018, No. 126, pp. 388–398.
4. Joshi A., Meza J., Costa S., Puricelli Perin D. M., Trout K., Rayamajih A. The role of information and communication technology in community outreach, academic and research collaboration, and education and support services (IT-CARES), *Perspective in helth information management (online research journal),* 2013, Volume 10 (Fall), 15 p.
5. Saidani N. Towards a better comprehension of adaptation to information and communication technologies : a multi-level approach, Dissertation of PhD. Georgia State University, USA, 2016. – 220 p.
6. Buinytska O. P. Informatsiini tekhnolohii ta tekhnichni zasoby navchannia. Kiev, Tsentr navchalnoi literatury, 2017, 240 p.
7. Kureychik V. V., Bova V. V., Nuzhnov E. V., Rodzin S. I. Integrirovannaya instrumentalnaya sreda podderzhki innovatsionnykh obrazovatelnykh protsessov, *Otkrytoye obrazovaniye*, 2010, No. 4, pp. 101–111.
8. Rastrigin L. A., Erenshteyn M. Kh. Adaptivnoye obucheniye s modelyu obuchayemogo. Riga, Zinatne, 1988, 160 p.
9. Mazurok T. L. Sinergeticheskaya model individualizirovannogo upravleniya obucheniyem, *Matematicheskiye mashiny i sistemy,* 2010, No. 3, pp. 124–134.
10. Kureychik V. V., Bova V. V. Modelirovaniye protsessa predstavleniya znaniy v intellektualnykh obuchayushchikh sistemakh na osnove kompetentnostnogo podkhoda, *Otkrytoye obrazovaniye,* 2014, No. 3, pp. 42–48.
11. Trembach V. M. Sistemy upravleniya bazami evolyutsioniruyushchikh znaniy dlya resheniya zadach nepreryvnogo obrazovaniya. Moscow, MESI, 2013, 255 p.
12. Lisitsyna L. S. Metodologiya proyektirovaniya modulnykh kompetentnostno-oriyentirovannykh obrazovatelnykh programm: metodicheskoye posobiye. SPb, SPbGU ITMO, 2009, 50 p.
13. Solomon J. Numerical algorithms: methods for computer vision, machine learning, and graphics : textbook. USA, CRC Press (AK Peters, Ltd.), 2015, 400 p.
14. Yang X. Optimization techniques and applications with examples. USA, UK, WILEY, 2018, 384 p.
15. Stecca G. Eds.: Operations research applications. Italy, AIRO (Associazone Italiana di Ricerca Operativa), 2017, 123 p.
16. Chernorutskiy I. G. Metody optimizatsii v teorii upravleniya: uchebnoye posobiye. SPB, Piter. 2004, 256 p.
17. Information technology strategy 2018-21: annual report of progress planned GB.331-PFA-5-2018, Eds. : Information and technology management department, Inernetional labour office. Geneva, Switzerland, INFOTEC, ILO, 2017, 26 p.
18. Measuring the information society report 2018, Eds.: International Telecommunication Union, Sanou B. Geneva, Switzerland, ITU Publications, 2018, Volume 1, 204 p.
19. Rocha A., Adeli H., Reis L. P., Costanzo S. Eds. Trends and advances in information systems and technologies, *2018 World conference on information systems and technologies WorldCIST'18, Naples, Italy, 27–29 March, 2018 : proceedings.* Naples, Italy, Springers International Publishing, 2018, Volume 3 (347), 406 p.
20. Hammoudi S., Smialek M., Camp O., Filipe J., Eds. Enterprise information systems, *20-th International conference ICEIS 2018, Funchal, Madeira, Portugal, 21–24 March, 2018, proceedings*. Madeira, Portugal, SciTePress, Science Technology Publications, Lda, 2018, Volume 1, 440 p.
21. Nagamalai D., Meghanathan N. Eds. Computer Science and Information Technology, *Forth International conference CoSIT-2017, Geneva, Switzerland, 25–26 March, 2017, proceedings.* Geneva, Switzerland, AIRCC Publishing Corporation, 2017, 208 p.
22. Antonenko V. M., Mamchenko S. D., Rohushyna Yu. V. Suchasni informatsiini systemy i tekhnolohii: upravlinnia znanniamy, navchalnyi posibnyk. Irpin, Natsionalnyi universytet DPS Ukrainy, 2016, 212 p.
23. Tabunshchyk H. V., Kudermetov R. K. , Prytula A. V. Proektuvannia, modeliuvannia ta analiz informatsiinykh system, navchalnyi posibnyk. Zaporizhzhia, ZNTU, 2011, 292 p.
24. Esipov B. A. Metody optimizatsii i issledovaniya operatsiy. Konspekt lektsiy, uchebnoye posobiye. Samara, Izd-vo Samar. aerokosm. un-ta. 2007, 180 p.
25. Informatsiini potoky ta yikh klasyfikatsiia. Elektronnyi resurs. Rezhym dostupu : http: // pidruchniki.com / 68003 / logistika / informatsiyni_potoki_klasifikatsiya].
26. Devyanin P. N. Modeli bezopasnosti informatsionnykh potokov. Modeli bezopasnosti informatsionnykh sistem: uchebnoye posobiye dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy. Moscow, "Akademiya", 2005, 468 p., P. 55–66.
27. Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V. Models of training procedures, *Radio Electronics, Computer Science, Control,* 2018, No. 4 (47), pp. 51–60. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-5.

Received 02.10.2018.
Accepted 11.02.2019.

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

УДК 510.6

МОДЕЛЮВАННЯ ТОГО, ЯКИЙ НАВЧАЄ, ТА ТИХ, ЯКИХ НАВЧАЮТЬ, НА ЗАСАДАХ КОМПЛЕКСНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПІДХОДУ ДО ВДОСКОНАЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І СИСТЕМ НАВЧАННЯ

Ходаков В. Є. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету, Херсон, Україна.

Соколов А. Є. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету, Херсон, Україна.

Веселовська Г. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету, Херсон, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто задачу обґрунтування методів побудови моделей того, який навчає, та тих, яких навчають, що враховують особливості їхньої інформаційної діяльності. Об'єктом дослідження були моделі того, який навчає, та тих, яких навчають, як учасників інформаційної взаємодії. Мета роботи – розв'язування задач концептуалізації та формалізації, орієнтованих на моделювання підсистеми того, який навчає, в рамках інформаційної технології навчання, а також на моделювання інформаційних потоків та інформаційних процедур в моделі підсистеми того, якого навчають.

Метод. Ключовими складовими систем і процесів навчання є той, який навчає, та ті, яких навчають. Виділені істотні особливості інформаційної взаємодії того, який навчає, та тих, яких навчають. В основу покладене поняття інформаційного потоку, виділені специфічні властивості інформаційних потоків, характерні для процесів навчання та важливі для їхнього успішного перебігу. Запропоновано методи моделювання ключових компонентів системи навчання як інформаційної системи, таких як: підсистема того, який навчає, розглянута з точки зору застосування інформаційних технологій навчання; підсистема того, якого навчають, що надається під кутом зору задіяння інформаційних потоків та інформаційних процедур.

Результати. Запропоновані моделі реалізовані програмно та вивчені практично в процесах навчання в підсумку відпрацювання завдань моделювання того, який навчає, та тих, яких навчають, як учасників інформаційної взаємодії.

Висновки. Проведений експеримент підтвердив дієвість і валідність концепцій і формалізмів, доцільність їхнього впровадження в інформаційні системи, процеси та технології навчання з метою підвищення ефективності процесів отримання та практичного втілення моделей інформаційної діяльності того, який навчає, та тих, яких навчають. Подальший розвиток досліджень передбачає розгляд ширшого кола аспектів інформаційної діяльності того, який навчає, та тих, яких навчають, а також відповідних експериментальних апробацій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: моделювання, той, який навчає, той, якого навчають, інформація, інформаційні системи, інформаційні процеси, інформаційні технології.

УДК 510.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБУЧАЮЩЕГО И ОБУЧАЕМЫХ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ ОБУЧЕНИЯ

Ходаков В. Е. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий Херсонского национального технического университета, Херсон, Украина.

Соколов А. Е. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета, Херсон, Украина.

Веселовская Г. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета, Херсон, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена задача обоснования методов построения моделей обучающего и обучаемых, учитывающих особенности их информационной деятельности. Объектом исследования являлись модели обучающего и обучаемых как участников информационного взаимодействия. Цель работы – решение задач концептуализации и формализации, ориентированных на моделирование подсистемы обучающего в рамках информационной технологии обучения, а также на моделирование информационных потоков и информационных процедур в модели подсистемы обучаемого.

Метод. Ключевыми составляющими систем и процессов обучения являются обучающий и обучаемые. Выделены существенные особенности информационного взаимодействия обучающего и обучаемых. В основу положено понятие информационного потока, выделены специфические свойства информационных потоков, характерные для процессов обучения и важные для их успешного протекания. Предложены методы моделирования ключевых компонентов системы обучения как информационной системы, таких как: подсистема обучающего, рассматриваемая с точки зрения применения информационных технологий обучения; подсистема обучаемого, представляемая под углом зрения задействования информационных потоков и информационных процедур.

Результаты. Предложенные модели реализованы программно и изучены практически в процессах обучения в итоге отработки заданий моделирования обучающего и обучаемых как участников информационного взаимодействия.

Выводы. Проведенный эксперимент подтвердил действенность и валидность концепций и формализмов, целесообразность их внедрения в информационные системы, процессы и технологии обучения с целью роста эффективности процессов получения и практического воплощения моделей информационной деятельности обучающего и

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

обучаемых. Дальнейшее развитие исследований предполагает рассмотрение более широкого круга аспектов информационной деятельности обучающего и обучаемых, а также соответствующих экспериментальных апробаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моделирование, обучающий, обучаемый, информация, информационные системы, информационные процессы, информационные технологии.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Willcox K. E. Online education : a catalyst for higher education reforms / K. E. Willcox, S. Sarma, P. H. Lippel // Massachusetts Institute of Technology online education policy initiative (Final Report). – Cambridge : MIT, 2016. – 56 p.
2. Higher education in the digital age. Moving academia online / Eds.: A. Zorn, J. Haywood, J. Glachant. – Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA : Edward Edgar Elgar Publishing, 2018. – 170 p.
3. Xing W. Exploring the relationship between online discourse and commitment in Twitter professional learning communities / W. Xing, G. Fei // Computers & Education. – 2018. – № 126. – P. 388–398.
4. Joshi A. The role of information and communication technology in community outreach, academic and research collaboration, and education and support services (IT-CARES) / [A. Joshi, J. Meza, S. Costa et al.] // Perspective in helth information management (online research journal). – 2013. – Volume 10 (Fall). – 15 p.
5. Saidani N. Towards a better comprehension of adaptation to information and communication technologies : a multi-level approach / Dissertation of PhD. – Georgia State University, USA, 2016. – 220 p.
6. Буйницька О. П. Інформаційні технології та технічні засоби навчання / О. П. Буйницька. – К. : Центр навчальної літератури, 2017. – 240 с.
7. Интегрированная инструментальная среда поддержки инновационных образовательных процессов [В. В. Курейчик, В. В. Бова, Е. В. Нужнов, С. И. Родзин] // Открытое образование. – 2010. – № 4. – С. 101–111.
8. Растригин Л. А. Адаптивное обучение с моделью обучаемого / Л. А. Растригин, М. Х. Эренштейн. – Рига : Зинатне, 1988. – 160 с.
9. Мазурок Т. Л. Синергетическая модель индивидуализированного управления обучением // Математические машины и системы / Т. Л. Мазурок. – 2010. – № 3. – С. 124–134.
10. Курейчик В. В. Моделирование процесса представления знаний в интеллектуальных обучающих системах на основе компетентностного подхода / В. В. Курейчик, В. В. Бова // Открытое образование. – 2014. – № 3. – С. 42–48.
11. Трембач В. М. Системы управления базами эволюционирующих знаний для решения задач непрерывного образования / В. М. Трембач. – М. : МЭСИ, 2013. – 255 с.
12. Лисицына Л. С. Методология проектирования модульных компетентностно-ориентированных образовательных программ : методическое пособие / Л. С. Лисицына. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 50 с.
13. Solomon J. Numerical algorithms: methods for computer vision, machine learning, and graphics : textbook / J. Solomon. – USA : CRC Press (AK Peters, Ltd.), 2015. – 400 p.
14. Yang X. Optimization techniques and applications with examples / X. Yang. – USA, UK : WILEY, 2018. – 384 p.
15. Operations research applications / Eds.: G. Stecca. – Rome, Italy : AIRO (Associazone Italiana di Ricerca Operativa), 2017. – 123 p.
16. Черноруцкий И. Г. Методы оптимизации в теории управления : учебное пособие / И. Г. Черноруцкий. – СПб : Питер, 2004. – 256 с.
17. Information technology strategy 2018-21: annual report of progress planned GB.331-PFA-5-2018 / Eds. : Information and technology management department, Inernetional labour office. – Geneva, Switzerland : INFOTEC, ILO, 2017. – 26 p.
18. Measuring the information society report 2018 / Eds.: International Telecommunication Union, Sanou B. – Geneva, Switzerland : ITU Publications, 2018. – Volume 1. – 204 p.
19. Trends and advances in information systems and technologies : 2018 World conference on information systems and technologies WorldCIST`18, Naples, Italy, 27–29 March, 2018 : proceedings / Eds. : A. Rocha, H. Adeli, L. P. Reis, S. Costanzo. – Naples, Italy : Springers International Publishing, 2018. – Volume 3 (347). – 406 p.
20. Enterprise information systems : 20-th International conference ICEIS 2018, Funchal, Madeira, Portugal, 21–24 March, 2018 : proceedings / Eds. : S. Hammoudi, M. Smialek, O. Camp, J. Filipe. – Madeira, Portugal : SciTePress, Science Technology Publications, Lda, 2018. – Volume 1. – 440 p.
21. Computer Science and Information Technology : Forth International conference CoSIT-2017, Geneva, Switzerland, 25–26 March, 2017 : proceedings / Eds. : D. Nagamalai, N. Meghanathan. – Geneva, Switzerland : AIRCC Publishing Corporation, 2017. – 208 p.
22. Антоненко В. М. Сучасні інформаційні системи і технології: управління знаннями : навчальний посібник / В. М. Антоненко, С. Д. Мамченко, Ю. В. Рогушина. – Ірпінь : Національний університет ДПС України, 2016. – 212 с.
23. Табунщик Г. В. Проектування, моделювання та аналіз інформаційних систем : навчальний посібник / Г. В. Табунщик, Р. К. Кудерметов, А. В. Притула. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2011. – 292 с.
24. Есипов Б. А. Методы оптимизации и исследования операций. Конспект лекций : учебное пособие / Б. А. Есипов. – Самара : Изд-во. Самар. аэрокосм. ун-та, 2007. – 180 с.
25. Інформаційні потоки та їх класифікація. – [Електронний ресурс. – Режим доступу: http://pidruchniki.com/68003/logistika/informatsiyni_potoki_klasifikatsiya].
26. Девянин П. Н. Модели безопасности информационных потоков / П. Н. Девянин // Модели безопасности информационных систем : учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – М. : «Академия», 2005. – 468 с. – С. 55–66.
27. Khodakov V. Ye. Models of training procedures / V. Ye. Khodakov, A. Ye. Sokolov, G. V. Veselovskaya // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – № 4 (47). – P. 51–60. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-5.

© Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-13

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

УДК 602.1:519.85:53.082.9:616-07

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КІБЕР-ФІЗИЧНОЇ ІМУНОСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ НА ГЕКСАГОНАЛЬНІЙ РЕШІТЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕШІТЧАСТИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ІЗ ЗАПІЗНЕННЯМ

Марценюк В. П. – д-р техн. наук, професор кафедри інформатики та автоматики Університету в Бєльско-Бялій, м. Бєльско-Бяла, Польща.

Сверстюк А. С. – канд. техн. наук, доцент кафедри медичної інформатики Тернопільского державного медичного університету імені І. Я. Горбачевського, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Важливим етапом проектування кібер-фізичних імуносенсорних систем є розробка та дослідження їх математичних та комп'ютерних моделей, побудова яких опиралася б на біологічних припущеннях для отримання відповідних систем диференціальних рівнянь популяційної динаміки. Математичне моделювання дозволило б отримати значення параметрів, які б забезпечили операційну стійкість імуносенсорних систем.

Мета. Метою роботи є розробка математичної та комп'ютерної моделі кібер-фізичної імуносенсорної системи з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням на гексагональній решітці та дослідження її стійкості.

Метод. В роботі розроблено математичну та комп'ютерну моделі кібер-фізичної імуносенсорної системи на гексагональній решітці. Для моделювання неперервної динаміки використано систему решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням. Для моделювання дискретних подій використано динамічну логіку першого порядку. Описано постійні стани моделі як розв'язки відповідних алгебраїчних систем. Висновок про стійкість робиться на основі аналізу відповідних фазових діаграм, решітчастих зображень та сигналів, отриманих з відповідної компютерної моделі.

Результати. Представлено аналіз результатів чисельного моделювання досліджуваної моделі у вигляді зображення фазових площин, решітчастих зображень ймовірності зв'язків антигенів з антитілами та елекричного сигналу з перетворювача, який характеризує кількість флуоресціюючих пікселів.

Висновки. Проведено математичне та комп'ютерне моделювання кібер-фізичної імуносенсорної системи. Встановлено, що її якісна поведінка суттєво залежить від часу імунної відповіді. Висновок про стійкість імуносенсорів може бути зроблено на основі решітчастого зображення пікселів, що флуоресціюють. Електричний сигнал, що моделюється кількістю імунопікселів, які флуоресціюють, є важливим при проектуванні кібер-фізичних імуносенсорних систем та дослідженнях їх стійкості. Граничний цикл або стійкий фокус визначають відповідний вигляд імуносенсорного електричного сигналу. Отримані експериментальні результати дали змогу виконати повний аналіз стійкості моделі іммуносенсора з врахуванням запізнення в часі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: комп'ютерне моделювання; математичне моделювання; кібер-фізична система; імуносенсорна система; біосенсор; імуносенсор; диференціальні рівняння із запізненням; решітчасті диференціальні рівняння; стійкість моделі; гексагональна решітка.

АБРЕВІАТУРИ

КФС – кібер-фізична система;
КФСС – кібер-фізична сенсорна система;
КФІСС – кібер-фізична імуносенсорна система;
ГП – гібридна програма.

НОМЕНКЛАТУРА

BI_j – решітчасте зображення ймовірності зв'язування антигенів антитілами в імуносенсорі j;

D – коефіцієнт дифузії;

$D\Delta^{-2}$ – швидкість дифузії;

$F_{i,j,k}(t)$ – концентрація антитіл в імунопікселі;

FL_j – решітчасте зображення флуоресценціюючих пікселів в імуносенсорі j;

ISB – набір імуносенсорів;

i, j, k – координати імунопікселів;

k_{fl} – коефіцієнт пропорційності інтенсивності флуоресценції до кількості контактів між антитілами та антигенами;

n – коефіцієнт дифузійного дисбалансу;

N – ціле натуральне число, яке характеризує кількість імунопікселів в гексагональній решітці;

PP_j – фазові портрети імунопікселів імуносенсора j;

QA_j – набір вихідних зображень та сигналів, що характеризують динамічні властивості імуносенсора;

s_j – зображення вихідного сигналу імуносенсора j;

s_{fl} – стан флуоресценції;

$s_{non\,fl}$ – нефлуоресценцентний стан;

$\hat{S}$ – просторовий оператор дифузії між сусідніми пікселями;

$V_{i,j,k}(t)$ – концентрація антигенів;

γ – ймовірністна швидкість нейтралізації антиге-

© Марценюк В. П., Сверстюк А. С., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-14

нів антитілами;

Δ – відстань між пікселями;

δ_f – швидкість, з якою популяція антитіл прагне до деякої межі насичення;

δ_υ – швидкість, з якою популяція антигенів прагне до деякої межі насичення;

$\varepsilon_{i,j,k}$ – стан рівноваги;

$\varepsilon_{i,j,k}^{0,0}$ – стійкий стан без антигенів та антитіл;

$\varepsilon_{i,j,k}^{*,0}$ – стійкий стан без антитіл;

$\varepsilon^{\text{ідент}}$ – ідентичний ендемічний стійкий стан;

$\varepsilon^{\text{неідент}}$ – неідентичний ендемічний стійкий стан;

$\eta\gamma$ – ймовірнісна швидкість імунної відповіді на збільшення щільності антигенів;

Θ_{fl} – порогове значення флуоресценції;

μ_f – постійна смертності антитіл;

τ – постійна запізнення в часі, з якою настає імунна відповідь;

Φ_t – еволюційне доменне обмеження у вигляді формули логіки першого порядку.

ВСТУП

КФС – фізична система, яка реалізує інтеграцію обчислень та фізичних процесів. Вони відбуваються найчастіше у вигляді вбудованих систем та мереж для моніторингу та контролю фізичних процесів в системах зі зворотним зв'язком. У таких системах динаміка фізичних процесів є джерелом інформації досліджуваного явища з можливістю контролю та розрахунку сигналів керування об'єктом [1].

КФС ототожнюються з проявом четвертої промислової революції, яка відбувається в сучасному світі [2], і яка пов'язується з розвитком технологій «Internet of Things (Інтернет речей)», де необхідно використовувати сигнали від давачів і вимірювальних приладів. Системні дослідження КФС грунтуються на використанні математичного та комп'ютерного моделювання. У роботі [3] із застосуванням математичного моделювання представлено огляд КФС в різних галузях і застосуваннях – мережеве керування, гібридні системи, обчислення в реальному часі, мережі реального часу, безпровідні сенсорні мережі, системи захисту і розробки, керовані моделями. З метою математичного та комп'ютерного моделювання КФС А. Платцер запропонував підхід на основі «динамічної логіки» [4], [5]. При цьому використовують ГП на простій мові програмування з простою семантикою, де програміст може звертатись безпосередньо до значень змінних, які представляють реальні величини і визначають їх динаміку.

Біосенсори є альтернативою відомим методам вимірювання, які використовують в конструкції біологічний матеріал, що забезпечує дуже високу селективність та дає змогу швидко і просто проводити вимірювання [6–8]. Дослідження КФС на основі біосенсорів та імуносенсорів зокрема є особливо актуальними в зв'язку з необхідністю більш точних методів моніторингу та аналізу різних параметрів медико-біологічних процесів. Важливим етапом проектування КФІСС є розробка та дослідження їх математичних моделей, які б адекватно відображали процеси, що лежать в основі їх функціонування.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Імуносенсори [9] є підгрупою біосенсорів, в яких відбувається імунохімічна реакція пов'язана з перетворювачем. Принцип роботи усіх імуносенсорів полягає в специфічному молекулярному розпізнаванні антигенів антитілами для утворення стабільного комплексу. В імуносенсорних пристроях використовуються чотири основні види детектування: електрохімічний (потенціометричний, амперометричний або кондуктометричний (ємнісний), оптичний і термометричний). Усі типи сенсорів можуть використовуватися, як прямі (немарковані) або як непрямі (марковані) імуносенсори. Прямі сенсори здатні виявляти фізичні зміни під час утворення імунного комплексу, в той час як непрямі, використовують різні рівні генерованого сигналу, які дають змогу більш чутливо та універсально проводити детектування у вимірювальних системах [9].

Клітинні біосенсори можуть застосовуватися для кількісної оцінки інфікування організму за допомогою певних електрохімічних чи оптичних явищ. В роботі [10] описано клітинний біосенсор, який використовує електрохімічну імпедансну спектроскопію. Даний біосенсор призначений для підрахунку людських клітин CD4+. Область зондування цього біосенсора включає в себе електродні пікселі, розмір кожного з яких порівнюваний з розміром клітин CD4+, які захоплюються пікселями електроду. Клитини виявляються шляхом спостереження за інформативними змінами на пікселі. Стан «Ввімкнено» або «Вимкнено» електродного пікселя вказує на виявлення однієї клітини CD4+. Таким чином, щоб підрахувати кількість клітин CD4+, підсумовують електродні пікселі в стані «Ввімкнено». Цей загальний підхід до кількісного виявлення клітин використано для моделювання імуносенсорної системи, яка грунтується на явищі флуоресценції, в даній роботі.

Визначення терміну КФСС, наведене в [11], передбачає для сенсорної системи «більш високий ступінь поєднання, розподілення системи, можливість використовувати вбудовані системи в області автоматизації та дотримання діючих стандартів». Таке трактування використано і для побудови функціональної схеми КФІСС, її математичного та компютерного моделювання.

КФСС відносяться до високоінтелектуалізованих інформаційних систем. Вони використовують доступний набір інтерфейсів, які дають змогу отримувати швидку та достовірну інформацію про стан та внутрішні дані системи, які повинні бути доступні для

© Марценюк В. П., Сверстюк А. С., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-14

інших КФС. Згідно [11] КФСС, як самоорганізуюча система, потребує всебічних знань про власну динамічну структуру та інфраструктуру загальної системи. Для цього визначають типи сенсорних пристроїв, враховуючи їх функціональне застосування. Для прикладу, імуносенсори можуть використовуватися для оцінки критичних станів при серцево-судинних захворюваннях, величини інсуліну при вимірюванні величини глюкози в крові, виявлення кількісних показників у деяких фармацевтичих сполуках і ін.

Для розробки та дослідження математичної та комп'ютерної моделі КФІСС з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням на гексагональній решітці необхідно вирішити наступні завдання:

– розробка функціональної схеми КФІСС;

– розробка математичної моделі неперервної динаміки КФІСС на основі вхідних параметрів моделі β, γ, μ_f, η, δ_υ, δ_f, τ;

– розробка математичної моделі дискретної динамічної логіки КФІСС на основі вхідних параметрів $k_{fl}(t)$, Θ_{fl};

– визначення постійних станів для дослідження стійкості моделі КФІСС на гексагональній решітці;

– побудова за допомогою комп'ютерного моделювання в пакеті R КФІСС зображення фазових площин, решітчастих зображень ймовірностей зв'язків антигенів з антитілами, решітчастих зображень флуоресценціюючих пікселів, електричного сигналу з перетворювача, який характеризує кількість флуоресценціюючих пікселів.

Об'єктом дослідження є КФІСС, що представлена тривимірним масивом імунопікселів.

Предметом дослідження є математична та комп'ютерна моделі КФІСС на гексагональній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням.

Мета роботи. Розробити математичну та комп'ютерну моделі КФІСС на основі тривимірного масиву імунопікселів з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням на гексагональній решітці та дослідити її стійкість.

2 ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Нехай ми маємо набір імуносенсорів $ISB = \{sensor_j\}$, $j = 1,2,...,n$. Кожен імуносенсор будемо розглядати як сукупність числових параметрів $sensor_j = \{\beta_j, \gamma_j, \mu_{f,j}, \eta_j, \delta_{\upsilon,j}, \delta_{f,j}, \tau_j, k_{fl,j}(t), \Theta_{fl,j}\}$.

Тоді задача якісного аналізу операційної стійкості муносенсора полягає у визначенні набору вихідних зображень та сигналів $QA_j = \{PP_j, BI_j, FL_j, s_j\}$, що характеризують динамічні властивості імуносенсора $sensor_j$ та будуються на основі відповідної математичної моделі.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У роботі [11] запропоновано загальну структуру КФСС. При застосуванні цього підходу у випадку імуносенсорів можна виокремити три види завдань: отримати загальну інформацію про імуносенсор; виміряти імунологічні показники з перетворенням одиниць та калібруванням; взаємодіяти з іншими імуносенсорами.

В основі функціональної схеми КФІСС (зовнішній прямокутник на рис. 1) покладено концепцію КФСС з врахуванням особливостей інтелектуальних імуносенсорів. З додатковими навиками (пунктирна лінія на рис. 1) імуносенсор розширюється до КФІСС.

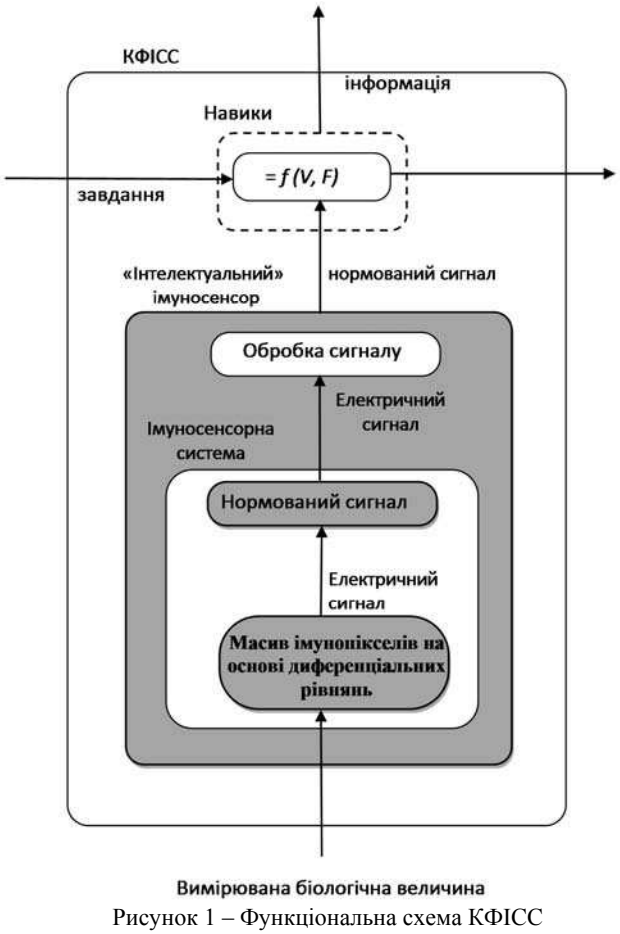


Рисунок 1 – Функціональна схема КФІСС

Для дослідження неперервної динаміки КФІСС використовується математична модель за допомогою нелінійних решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням.

Розглядається математична модель імуносенсора на основі гексагональної решітки. При цьому для нумерації імунопікселів (i, j, k), $i, j, k = \overline{-N, N}$, $i + j + k = 0$ використовується кубічна система координат [12].

Математична модель імуносенсора на основі гексагональної решітки має вигляд решітчастої системи диференціальних рівнянь із запізненням

© Марценюк В. П., Сверстюк А. С., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-14

$$\frac{dV_{i,j,k}(t)}{dt} = (\beta - \gamma F_{i,j,k}(t-\tau)) - \\ -\delta_{\upsilon} V_{i,j,k}(t-\tau)V_{i,j,k}(t) + \hat{S}\{V_{i,j,k}\}, \\ \frac{dF_{i,j,k}(t)}{dt} = (-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j,k}(t-\tau) - \\ -\delta_f F_{i,j,k}(t)F_{i,j,k}(t))F_{i,j,k}(t). \quad (1)$$

яка задана початковими функціями (2):

$$V_{i,j,k}(t) = V^0_{i,j,k}(t) \geq 0, \\ F_{i,j,k}(t) = F^0_{i,j,k}(t) \geq 0, \quad t \in [-\tau, 0), \quad (2) \\ V_{i,j,k}(0), \quad F_{i,j,k}(0) > 0.$$

та набором вхідних параметрів β, γ, μ_f, η, δ_{υ}, δ_f, τ.

Модель використовує просторовий оператор, який запропонований в [13] (додаткова інформація с. 10) $\hat{S}\{V_{i,j,k}\}$ вигляду (див. рис. 2):

$$\hat{S}\{V_{i,j,k}\} = \begin{cases} D\Delta^{-2}[V_{i+1,j,k-1} + V_{i+1,j-1,k} + \\ \quad + V_{i,j-1,k+1} + V_{i-1,j,k+1} + \\ \quad + V_{i-1,j+1,k} + V_{i,j+1,k-1} - 6nV_{i,j,k}], \\ i,j,k \in \overline{-N+1, N-1}, \quad i+j+k = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для математичного моделювання динамічної логіки КФІСС використовується синтаксис, який запропонований А. Платцером для загальної КФС [4] у вигляді мови програмування ГП. У випадку КФІСС перший рівень ГП є динамічною програмою, яка визначається наступною граматикою

$$a ::= \frac{dV_{i,j,k}(t)}{dt} = (\beta - \gamma F_{i,j,k}(t-\tau), \\ -\delta_{\upsilon} V_{i,j,k}(t-\tau))V_{i,j,k}(t) + \hat{S}\{V_{i,j,k}\}, \quad (4) \\ \frac{dF_{i,j,k}(t)}{dt} = (-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j,k}(t-\tau) - \delta_f F_{i,j,k}(t))F_{i,j,k}(t) \,\&\, \Phi_t.$$

У формулі (4) Φ_t є еволюційним доменним обмеженням у вигляді формули логіки першого порядку

$$\Phi_t \overset{\text{def}}{\equiv} V^{\min} \leq V_{i,j,k}(n) \leq V^{\max}, \\ \wedge F^{\min} \leq F_{i,j,k}(n) \leq F^{\max} \wedge i,j,k = \overline{-N,N} \wedge t > 0, \quad (5) \\ i+j+k = 0.$$

В результаті зв'язування антигенів з антитілами в імунопікселі відбувається явище флуоресценції. Функціонування імунопікселя (i,j,k) визначається двома станами. А саме, s_{fl} є станом флуоресценції та $s_{non\,fl}$ є одним із нефлуоресценцентних станів.

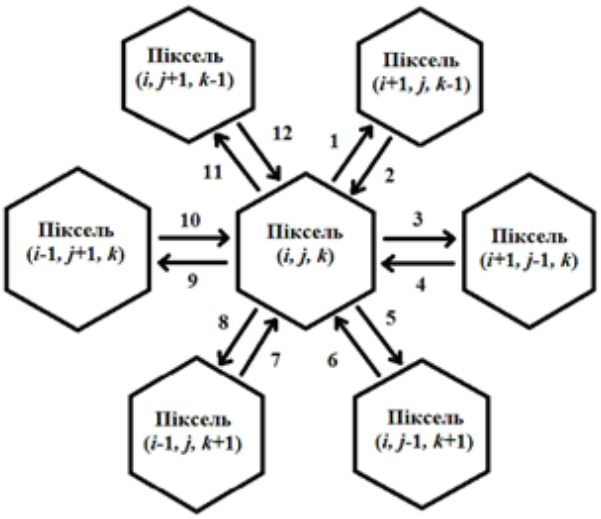


Рисунок 2 – Гексагональна решітка, яка пов'язує шість сусідніх пікселів в моделі імунопікселя з використанням кубічних координат: Позначення:

$1, 3, 5, 8, 9, 11 - \left(\frac{D}{\Delta^2} V_{i,j,k}(t)\right)$; $2 - \left(\frac{D}{\Delta^2} V_{i+1,j,k-1}(t)\right)$;

$4 - \left(\frac{D}{\Delta^2} V_{i+1,j-1,k}(t)\right)$;

$6 - \left(\frac{D}{\Delta^2} V_{i,j-1,k+1}(t)\right)$; $7 - \left(\frac{D}{\Delta^2} V_{i-1,j,k+1}(t)\right)$; $10 - \left(\frac{D}{\Delta^2} V_{i-1,j+1,k}(t)\right)$; $12 - \left(\frac{D}{\Delta^2} V_{i,j+1,k-1}(t)\right)$

Інтенсивність флуоресценції пропорційна кількості контактів між антигенами та антитілами, тобто $k_{fl} V_{i,j,k}(t) F_{i,j,k}(t)$. Припускається, що піксель (i,j,k) знаходиться у стані флуоресценції, якщо

$$k_{fl} V_{i,j,k}(t) F_{i,j,k}(t) \geq \Theta_{fl},$$

де $\Theta_{fl} > 0$ є деяким пороговим значенням зв'язування, при якому відбувається явище флуоресценції.

Використавши в синтаксисі логіки першого порядку співвідношення задоволення $s \models L$ для формули логіки першого порядку L та стану s, можна визначити для конкретних пікселів (i,j,k); $i,j,k = \overline{-N,N}$, $i+j+k = 0$ стани s_{fl} і $s_{non\,fl}$, як

$$s_{ft} \models k_{fl} V_{i,j,k}(n) F_{i,j,k}(n) \geq \Theta_{fl}, \\ s_{nonfl} \models k_{fl} V_{i,j,k}(n) F_{i,j,k}(n) < \Theta_{fl}. \quad (6)$$

Дискретні зміни відбуваються в комп'ютерних програмах, коли вони приймають нові значення для

© Марценюк В. П., Сверстюк А. С., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-14

змінних. Така ситуація відбувається у випадку виникнення явища флуоресценції в пікселі (i, j, k), $i, j, k = \overline{-N, N}$, $i + j + k = 0$. У стані флуоресценції змінній $s_{f\,l,i,\,j,k}$ присвоюється значення 1. Це веде до дискретної, стрибкоподібної зміни, оскільки значення $s_{f\,l,i,\,j,k}$ змінюється миттєво.

При дослідженні стійкості математичної моделі імуносенсора на гексагональній решітці розраховуються постійні стани: стійкий стан без антитіл, стійкий стан без антигенів та антитіл, ідентичний та неідентичний ендемічні стійкі стани.

У загальному випадку стан рівноваги $\varepsilon_{i,j,k} \equiv \left(V_{i,j,k}, F_{i,j,k}\right)$, $i, j, k = \overline{-N, N}$, $i + j + k = 0$ для системи (1) можна знайти як розв'язок алгебраїчної системи:

$$\begin{aligned} &(\beta - \gamma F^*_{i,j,k} - \delta_\upsilon V^*_{i,j,k}) V^*_{i,j,k} + \hat{S}\left\{V^*_{i,j,k}\right\} = 0, \\ &(-\mu_f + \eta\gamma V^*_{i,j,k} - \delta_f F^*_{i,j,k}) F^*_{i,j,k} = 0. \end{aligned} \qquad (7)$$

Розглядаючи $\left(V_{i,j,k}, F_{i,j,k}\right)$, $i, j, k = \overline{-N, N}$, $i + j + k = 0$, маємо такі випадки.

Стійкий стан без антигенів та антитіл $\varepsilon^{0,0}_{i,j,k} \equiv \varepsilon^{0,0} = (0,0)$, $i, j, k = \overline{-N, N}$, $i + j + k = 0$.

Стійкий стан без антитіл $\varepsilon^{*,0}_{i,j,k} \equiv \varepsilon^{*,0} = \left(\dfrac{\beta}{\delta_\upsilon}, 0\right)$, $i, j, k = \overline{-N, N}$, $i + j + k = 0$.

Для ідентичного ендемічного стійкого стану розглянемо випадок, коли $V_{i,j,k} \equiv V^{\text{ідент}} > 0$, $i, j, k = \overline{-N, N}$, $i + j + k = 0$, $\left(\hat{S}\left\{V_{i,j,k}\right\} \equiv 0\right)$. Тоді отримаємо стійкий стан, при якому $\varepsilon_{i,j,k} \equiv \varepsilon^{\text{ідент}} = \left(V^{\text{ідент}}, F^{\text{ідент}}\right)$,

де $V^{\text{ідент}} = \dfrac{\beta\delta_f + \gamma\mu_f}{\eta\gamma^2 + \delta_\upsilon\delta_f}$, $F^{\text{ідент}} = \dfrac{-\mu_f\delta_\upsilon + \eta\gamma\beta}{\eta\gamma^2 + \delta_\upsilon\delta_f}$.

Тобто, якщо $-\mu_f\delta_\upsilon + \eta\gamma\beta > 0$, то $\varepsilon^{\text{ідент}}$ є ендемічним станом.

Для обчислення неідентичного ендемічного стаціонарного стану у загальному випадку потрібно розв'язати алгебраїчну систему (7) та знайти ендемічний стійкий стан. Останній вид постійного стану називатимемо неідентичним постійним станом $\varepsilon^{\text{неідент}} = (V^{\text{неідент}}_{i,j,k}, F^{\text{неідент}}_{i,j,k})$, $i, j, k = \overline{-N, N}$, $i + j + k = 0$. У випадку, якщо всі $(V^{\text{неідент}}_{i,j,k}, F^{\text{неідент}}_{i,j,k}) > 0$, тоді $\varepsilon^{\text{неідент}}$ є ендемічним станом. Значення $V^{\text{ідент}}$ та $F^{\text{ідент}}$ можуть бути використані як початкові наближення для чисельних методів розв'язування нелінійної алгебраїчної системи (7).

З метою комп'ютерного моделювання КФІСС використано мову програмування R та середовище розробки R Studio. Це пов'язано з тим, що, незважаючи на велике різноманіття мов програмування, які використовуються при розробці КФС (Assembly, C, C++, D, Java, JavaScript, Python, Ada та ін. [14]) мова R широко використовується в даний час у багатьох галузях, що займаються машинним навчанням і з чим будуть пов'язані подальші дослідження. Візуалізація даних в комп'ютерному моделюванні здійснена за допомогою пакету ggplot.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Чисельні експерименти на основі комп'ютерного моделювання проводилися із врахуванням цілого натурального числа N, яке характеризує кількість пікселів в гексагональній решітці. Розглянемо модель (1)–(3) при $N = 4$, $\beta = 2\text{хв}^{-1}$, $\gamma = 2\dfrac{\text{мл}}{\text{хв}\cdot\text{мкг}}$, $\mu_f = 1\text{хв}^{-1}$, $\eta = \dfrac{0{,}8}{\gamma}$, $\delta_\upsilon = 0{,}5\dfrac{\text{мл}}{\text{хв}\cdot\text{мкг}}$, $\delta_f = 0{,}5\dfrac{\text{мл}}{\text{хв}\cdot\text{мкг}}$, $n = 0{,}9$, $D = 0{,}2$, $\Delta = 0{,}3$. Комп'ютерне моделювання було реалізовано для різних значень τ.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

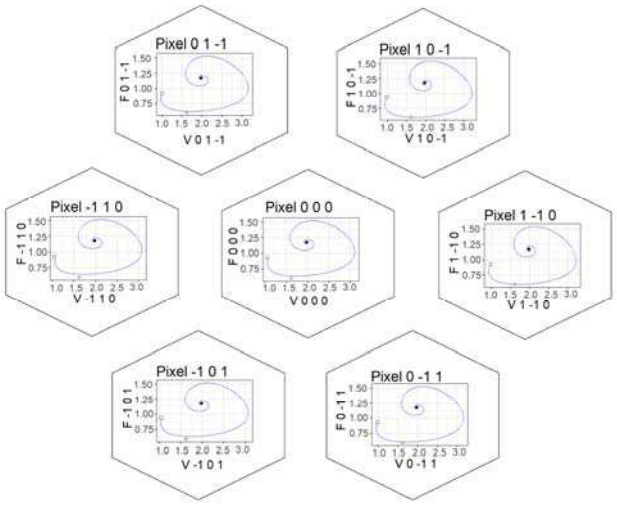
Проаналізовано тривалу поведінку моделі (1)–(3) при $\tau = 0{,}05$, $\tau = 0{,}25$, $\tau = 0{,}287$ з набором значень параметрів, які представлені вище (рис. 3–5). Спостерігаємо якісні зміни поведінки імунопікселів та моделі КФІСС в цілому.

6 ОБГОВОРЕННЯ

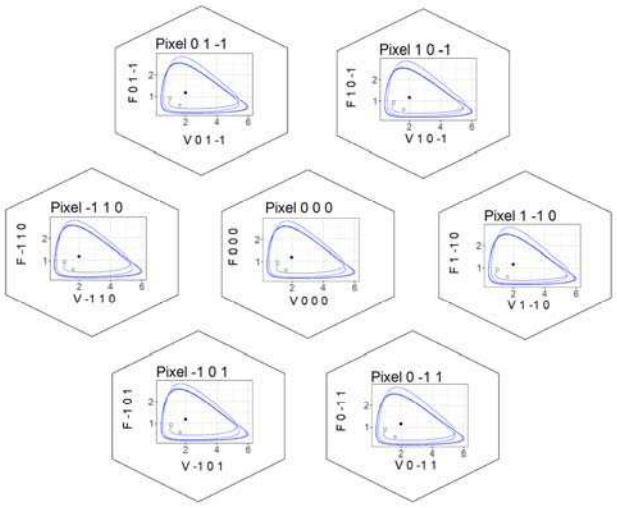
Аналізуючи фазові діаграми популяцій антигенів щодо антитіл (рис. 3а) можна зробити висновок, що при $\tau = 0{,}05$ розв'язок системи (1) прагне до неідентичного ендемічного стану, який в даному випадку є стійким фокусом. Такі залежності спостерігаються для всіх імунопікселів кібер-фізичної моделі імуносенсорної системи на гексагональній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням при $\tau \in [0, 0.25)$ (рис. 3а).

Аналізуючи фазові діаграми популяцій антигенів щодо антитіл (рис. 3б) можна зробити висновок, що при $\tau = 0{,}25$ виникає біфуркація Хопфа і всі подальші траєкторії відповідають стійким граничним циклам для всіх пікселів (рис. 3в). Для теоретичного обґрунтування виникнення біфуркації Хопфа необхідно обчислити відповідну пару чисто уявних розв'язків характеристичного рівняння лінеаризованої системи (1). Результати чисельного моделювання узгоджені з теоретичними результатами на основі теореми про біфуркацію Хопфа [15]. При цьому розв'язок системи (1) прагне до стійкого граничного циклу з двома локальними екстремумами (один локальний максимум і один локальний мінімум) в циклі.

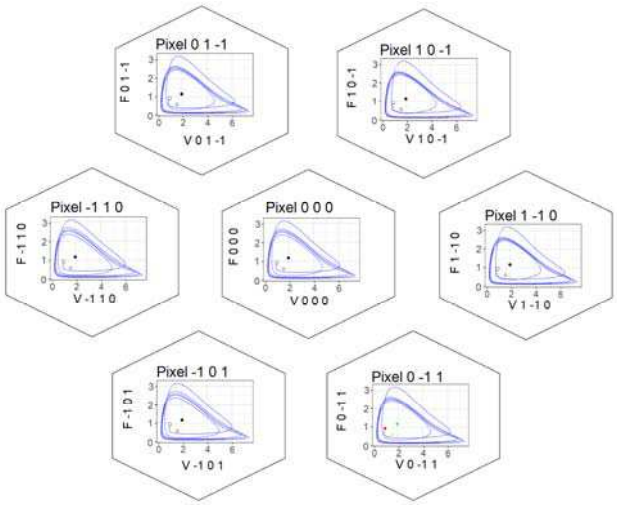
© Марценюк В. П., Сверстюк А. С., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-14



а

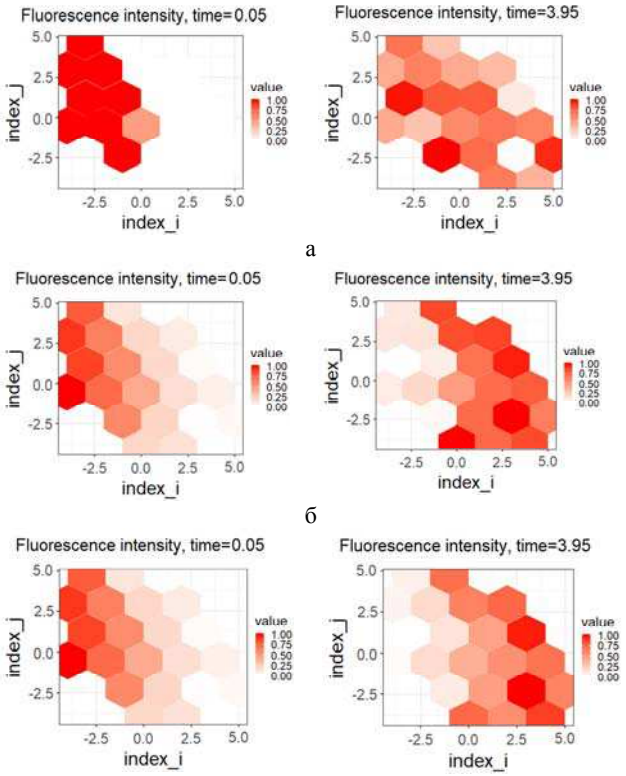


б



в

Рисунок 3 – Результати чисельного моделювання системи (1) при при
а – $\tau = 0.05$, б – $\tau = 0.25$, в – $\tau = 0.287$.
Зображення фазових площин в координатах $(V_{i,j,k}, F_{i,j,k})$ для пікселя $(0,0,0)$ і його шести сусідніх пікселів. Позначення: □ – початковий стан, ○ – ідентичний сталий стан, ● – неідентичний сталий стан

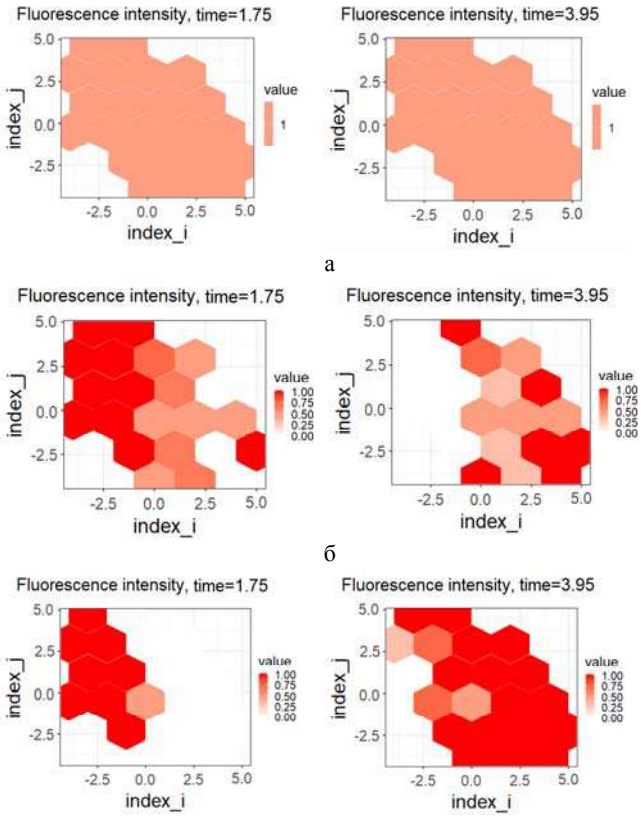


а

б

в

Рисунок 4 – Решітчасті зображення ймовірності зв’язків антигенів з антитілами в пікселях системи (1)
при а – $\tau = 0{,}05$, б – $\tau = 0{,}25$, в – $\tau = 0{,}287$



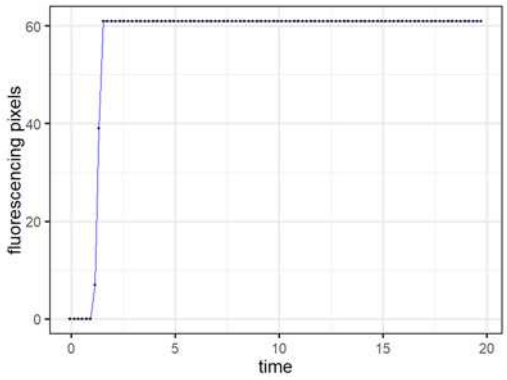
а

б

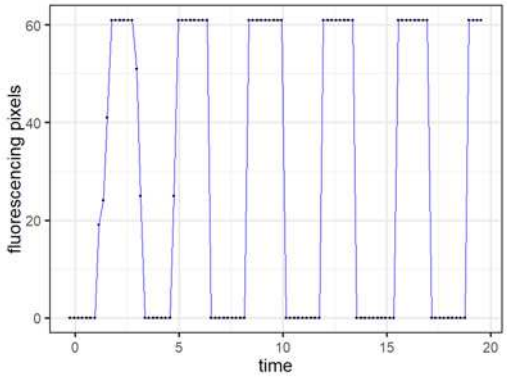
в

Рисунок 5 – Зображення флуоресценціюючих пікселів системи (1) при а – $\tau = 0{,}05$, б – $\tau = 0{,}25$, в – $\tau = 0{,}287$

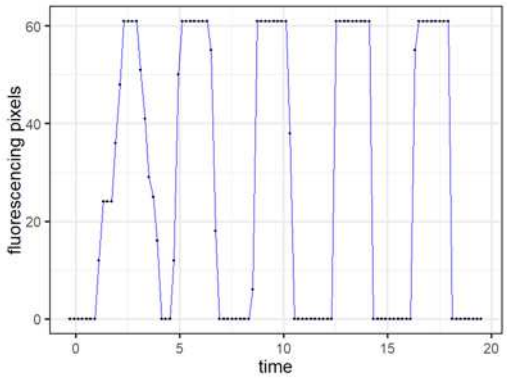
© Марценюк В. П., Сверстюк А. С., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-14



а



б



в

Рисунок 6 – Елекричний сигнал з перетворювача, який характеризує кількість флуоресціюючих пікселів при а – $\tau = 0{,}05$, б – $\tau = 0{,}25$, в – $\tau = 0{,}287$

Далі для комп'ютерного моделювання кібер-фізичної моделі імуносенсора було використано решітчасті графіки. Спершу побудовано відповідні графіки, на яких для кожного пікселя представлено ймовірність контакту антигенів з антитілами, як $V_{i,j,k} \times F_{i,j,k}$ при $\tau = 0{,}05$, $\tau = 0{,}25$, $\tau = 0{,}287$, представлені на рис. 4а–в.

На другому етапі комп'ютерного моделювання КФІСС отримано решітчасті графіки флуоресціюючих пікселів на основі виконання умови (6), які наведені на рис. 5а–в.

В якості прикладу завершального етапу комп'ютерного моделювання КФІСС отримано вигляд електричного сигналу перетворювача, який характеризує число флуоресціюючих пікселів в залежності від різного значення запізнення в часі τ (рис. 6а–в). Для чисельного моделювання КФІСС було використано порогове значення для флуоресценції $\Theta_{fl} = 1{,}5$.

На рис. 6а наведено результат чисельного моделювання системи (1) при $\tau = 0.05$, який відповідає стійкому фокусу. При $\tau = 0.25$, $r = 0.287$ спостерігається біжуча хвиля флуорисценціюючих пікселів, яка представлена на рис. 6 б,в.

Як показали результати чисельного аналізу, флуоресціюючі стани в імунопікселях змінюються відповідно до законів дискретної динаміки. Аналізуючи отримані результати, зроблено висновок, що при зміні значення τ якісно змінюється поведінка пікселів та КФІСС.

ВИСНОВКИ

В роботі розроблено математичну модель КФІСС на гексагональній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням, досліджено її стійкість. При цьому враховується наявність колоній антигенів та антитіл, що локалізовані у пікселях, а також дифузію колоній антигенів між пікселями. Математичний опис КФІСС містить неперервну популяційну динаміку, яку поєднано з динамічною логікою, що використовується для дискретних подій.

Комп'ютерне моделювання дозволяє отримати відповідні візуальні представлення змінних, що характеризують функціонування КФІСС. Так, висновок про стійкість імуносенсорів може бути зроблено на основі решітчастого зображення пікселів, що флуоресціюють. Електричний сигнал, що моделюється кількістю імунопікселів, які флуоресціюють, є важливим при проектуванні КФІСС та дослідженні їх стійкості. Стійкий фокус або граничний цикл визначають відповідний вигляд імуносенсорного електричного сигналу. Отримані експериментальні результати дають змогу виконати повний аналіз стійкості моделі іммуносенсора з врахуванням запізнення в часі.

Залишаються відкритими питання щодо використання стохастичних диференціальних рівнянь в якості математичних моделей КФІСС, що планується дослідити в наступних наших роботах.

ПОДЯКИ

В даній статті наведені результати виконання ініціативної міжкафедральної науково-дослідної роботи «Кібер-фізичне моделювання в медико-біологічних дослідженнях» ДВНЗ «Тернопільський державний медичний університет ім. І. Я. Горбачевського» та докторської дисертації доцента кафедри медичної інформатики Сверстюка Андрія Степановча на тему: «Комп'ютерне моделювання в кібер-фізичних дослідженнях медико-біологічних процесів на основі компартментних динамічних систем решітчастого типу».

© Марценюк В. П., Сверстюк А. С., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-14

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Meissner H. Implications of cyber-physical production systems on integrated process planning and scheduling / H. Meissner, J. Aurich // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 28. – P. 167–173.
2. Lee J. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.
3. Thiede S. Implementing cyber-physical production systems in learning factories / S. Thiede, M. Juraschek, C. Herrmann // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 54. – P. 7–12.
4. Platzer A. Differential dynamic logic for hybrid systems / A. Platzer // Journal of Automated Reasoning. – 2018. – Vol. 41, № 2. – P. 143–189.
5. Platzer A. Logical foundations of cyber-physical systems / A. Platzer. – Berlin: Springer, 2018. – 639 p.
6. Kłos-Witkowska A. The phenomenon of fluorescence in immunosensors / A. Kłos-Witkowska // Acta Biochimica Polonica. – 2016 – Vol. 63, № 2. – P. 215–221.
7. Martsenyuk V. P. Study of classification of immunosensors from viewpoint of medical tasks / V. P. Martsenyuk, A. Klos-Witkowska, A. S. Sverstiuk // Medical informatics and engineering. – 2018. – № 1(41). – P. 13–19.
8. Martsenyuk V. P. On principles, methods and areas of medical and biological application of optical immunosensors / V. P. Martsenyuk, A. Klos-Witkowska, A. S. Sverstiuk, T. V. Bihunyak // Medical informatics and engineering. – 2018. – № 2 (42). – P. 28–36.
9. Paper-based immunosensors: current trends in the types and applied detection techniques / [G. Zhu, X. Yin, D. Jin et al.] // Trends in Analytical Chemistry. – 2019. – Vol. 111. – P. 100–117.
10. Jiang X. Electrochemical impedance biosensor with electrode pixels for precise counting of CD4+ cells: A microchip for quantitative diagnosis of HIV infection status of AIDS patients [Text] / X. Jiang, M. Spencer // Biosensors and Bioelectronics. – 2010. – Vol. 25, Issue 7. – P. 1622–1628.
11. Characterization of Cyber-Physical Sensor Systems / [C. Berger, A. Hees, S. Braunreuther, G. Reinhart] // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 41. – P. 638–643.
12. Hexagonal grids [Electronic resurce]: Access mode: https://www.redblobgames.com/grids/hexagons/
13. A sensing array of radically coupled genetic biopixels / [A. Prindle, P. Samayoa, I. Razinkov et al.] // Nature. – 2011. – Vol. 481, № 7379. – P. 39–44.
14. Soulier P. A survey of language-based approaches to cyber-physical and embedded system development / P. Soulier, D. Li, J. Williams // Tsinghua Science and Technology. – 2015. – Vol. 20, № 2. – P. 130–141.
15. Hofbauer J. A hopf bifurcation theorem for difference equations approximating a differential equation / J. Hofbauer, G. Iooss // Monatshefte fur Mathematik. – 1984 – Vol. 98, № 2. – P. 99–113.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2019.
Після доробки 19.04.2019.

УДК 602.1:519.85:53.082.9:616-07

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКОЙ ИМУНОСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ НА ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ РЕШЕТКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕШЕТЧАСТЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Марценюк В. П. – д-р техн. наук, профессор кафедры информатики и автоматики, Университета в Бельско-Бялой, г. Бельско-Бяла, Польша.

Сверстюк А. С. – канд. техн. наук, доцент кафедры медицинской информатики, Тернопольского государственного медицинского университета имени И. Я. Горбачевского, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Важным этапом проектирования кибер-физических имуносенсорних систем является разработка и исследование их математических и компьютерных моделей, при построение которых использовались биологических предположениях для получения соответствующих систем дифференциальных уравнений популяционной динамики. Математическое моделирование позволило бы получить значения параметров, которые бы обеспечили операционную устойчивость имуносенсорних систем.

Цель. Целью работы является разработка математической и компьютерной модели кибер-физической имуносенсорной системы с использованием решетчатых дифференциальных уравнений с запаздыванием на гексагональной решетке и исследования ее устойчивости.

Метод. В работе разработана математическая и компьютерная модели кибер-физической иммуносенсорной системы на гексагональной решетке. Для моделирования непрерывной динамики использована система решетчатых дифференциальных уравнений с запаздыванием. Для моделирования дискретных событий использовано динамическое логику первого порядка. Описаны постоянные состояния модели, как решения соответствующих алгебраических систем. Вывод об устойчивости делается на основе анализа соответствующих фазовых диаграмм, решетчатых изображений и сигналов, полученных с соответствующей компьютерной модели.

Результаты. Представлен анализ результатов численного моделирования исследуемой модели в виде изображения фазовых плоскостей, решетчатых изображений вероятности связей антигенов с антителами и элекрический сигнал с преобразователя, характеризующий количество флуоресцирующих пикселей.

Выводы. Проведено математическое и компьютерное моделирование кибер-физической иммуносенсорной системы. Установлено, что ее качественное поведение существенно зависит от времени иммунного ответа. Вывод об устойчивости иммуносенсора может быть сделано на основе решетчатого изображения пикселей, что флуоресцируют. Электрический сигнал, моделируется количеством иммунопикселей, которые флуоресцируют, является важным при проектировании кибер-физических имуносенсорних систем и исследованиях их устойчивости. Предельный цикл или устойчивый фокус определяют соответствующий вид имуносенсорного электрического сигнала. Полученные экспериментальные результаты позволили выполнить полный анализ устойчивости модели иммуносенсора с учетом опоздания во времени.

© Марценюк В. П., Сверстюк А. С., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-14

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: компьютерное моделирование; математическое моделирование; кибер-физическая система; иммуносенсорная система; биосенсор; иммуносенсор; дифференциальные уравнения с опозданием; решетчастые дифференциальные уравнения; устойчивость модели; гексагональная решетка.

UDC 602.1:519.85:53.082.9:616-07

COMPUTER MODELING OF CYBER-PHYSICAL IMMUNOSENSOR SYSTEM IN A HEXAGONAL LATTICE USING LATTICE DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH DELAY

Martsenyuk V. P. – Dr. Sc., Professor of Computer Science and Automation, University of Bielsko-Biala, m. Bielsko-Biala, Poland.

Sverstiuk A. S. – PhD, Associate Professor of Medical Informatics Department, Ternopil State Medical University named after I. Ya. Gorbachevsky, Ukraine.

ABSTRACT

Context. An important stage in the design of cyber-physical immunosensory systems is the development and research of their mathematical and computer models, the construction of which would be based on biological assumptions to obtain appropriate systems of differential equations of population dynamics. Mathematical modeling would allow to obtain the value of parameters that would ensure the operational stability of immunosensory systems.

Objective. The aim of the work is to develop a mathematical and computer model of the cyber-physical immunosensory system using lattice-delayed differential equations on a hexagonal lattice and study its stability.

Method. The mathematical and computer models of the cyber-physical immunosensory system on the hexagonal lattice are developed. For the simulation of continuous dynamics, the system of lattice differential equations with delay was used. Dynamic logic of the first order is used to simulate discrete events. The permanent states of the model as solutions of the corresponding algebraic systems are described. The conclusion on stability is based on the analysis of the corresponding phase diagrams, lattice images and signals obtained from the corresponding computer model.

Results. The analysis of the results of numerical simulation of the investigated model in the form of an image of phase planes, lattice images of the probability of antibody bonds and an electron signal from the converter, which characterizes the number of fluorescing pixels, is presented.

Conclusions. Mathematical and computer modeling of the cyber-physical immunosensory system was performed. It is established that its qualitative behavior significantly depends on the time of the immune response. The conclusion on the stability of immunosensors can be made on the basis of the grid image of the pixels that are fluorescing. An electrical signal, modeled by the number of fluorescent immunopips, is important in the design of cyber-physiological immunosensory systems and studies of their resilience. Limit cycle or steady focus determine the appropriate form of immunosensory electrical signal. The experimental results obtained have made it possible to perform a complete analysis of the stability of the immunosensor model, taking into account the delay in time.

KEYWORDS: computer simulation; mathematical modeling; cyber-physical system; immunosensory system; biosensor; immunosensor; differential equations with delay; lattice differential equations; stability of the model; hexagonal lattice.

REFERENCES

1. Meissner H., Aurich J. Implications of cyber-physical production systems on integrated process planning and scheduling, *Procedia Manufacturing,* 2019, Vol. 28, pp. 167–173.
2. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems, *Manufacturing Letters,* 2015, Vol. 3, pp. 18–23.
3. Thiede S., Juraschek M., Herrmann C. Implementing cyber-physical production systems in learning factories, *Procedia CIRP,* 2016, Vol. 54, pp. 7–12.
4. Platzer A. Differential dynamic logic for hybrid systems, *Journal of Automated Reasoning*, 2018, Vol. 41, No. 2, pp. 143–189.
5. Platzer A. Logical foundations of cyber-physical systems. Berlin, Springer, 2018, 639 p.
6. Kłos-Witkowska A. The phenomenon of fluorescence in immunosensors, *Acta Biochimica Polonica*, 2016, Vol. 63, No. 2, pp. 215–221.
7. Martsenyuk V. P., Klos-Witkowska A., Sverstiuk A. S. Study of classification of immunosensors from viewpoint of medical tasks, *Medical informatics and engineering*, 2018, No. 1(41), pp. 13–19.
8. Martsenyuk V. P., Klos-Witkowska A., Sverstiuk A. S., Bihunyak T. V. On principles, methods and areas of medical and biological application of optical immunosensors, *Medical informatics and engineering*, 2018, No. 2 (42), pp. 28–36.
9. Zhu G., Yin X., Jin D., Zhang B., Gu Y., An Y. Paper-based immunosensors: current trends in the types and applied detection techniques, *Trends in Analytical Chemistry*, 2019, Vol. 111, pp. 100–117.
10. Jiang X., Spencer M. Electrochemical impedance biosensor with electrode pixels for precise counting of CD4+ cells: A microchip for quantitative diagnosis of HIV infection status of AIDS patients, *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, Vol. 25, Issue 7, pp. 1622–1628.
11. Berger C., Hees A., Braunreuther S., Reinhart G. Characterization of Cyber-Physical Sensor Systems, *Procedia CIRP,* 2016, Vol. 41, pp. 638–643.
12. Hexagonal grids [Electronic resurce]: Access mode: https://www.redblobgames.com/grids/hexagons/
13. Prindle A., Samayoa P., Razinkov I., Danino T., Tsimring L., Hasty J. A sensing array of radically coupled genetic biopixels, *Nature*, 2011, Vol. 481, No. 7379, pp. 39–44.
14. Soulier P., Li D., Williams J. A survey of language-based approaches to cyber-physical and embedded system development, *Tsinghua Science and Technology*, 2015, Vol. 20, No. 2, pp. 130–141.
15. Hofbauer J., Iooss G. A hopf bifurcation theorem for difference equations approximating a differential equation, *Monatshefte fur Mathematik,* 1984, Vol. 98, No. 2, pp. 99–113.

© Марценюк В. П., Сверстюк А. С., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-14

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

UDC 004.942:316.454.54

APPROACHES GOING TO DETERMINATION PERIODS OF THE HUMAN FACTOR OF NAVIGATORS DURING SUPERNUMERARY SITUATIONS

Nosov P. S. – PhD, Associate Professor of the chair Navigation and Electronic Navigation Systems Department, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Ben A. P. – PhD, Associate Professor, Deputy Rector for scientific and pedagogical work, Head of the Navigation and Electronic Navigation Systems Department, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Safonova A. F. – PhD, Associate Professor of the Kherson Polytechnic College, Ukraine.

Palamarchuk I. V. – Ms. Sc., Postgraduate student of the Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of identifying the manifestation of the human factor in the context of utility in maritime transport during emergency situations is considered. The aim of the study is to increase safety in maritime transport by identifying positive and negative human factors, as well as analyzing the behavioral reactions affecting the vessel's passage parameters.

Objective. The aim of the work is to determine the approaches and the construction of software tools to identify periods of manifestation of the human factor of the navigators during abnormal situations.

Method. The study identified the types of manifestations of the human factor in the form of intuitive (illogical) behavior of the navigator. The dependence of intuitive behavior, as a reaction, on exceeding the detection threshold of perception of service information, is given. It was determined that the distribution of information load among members of the navigation watch will significantly reduce the detection threshold of the navigator at the time of making management decisions.

It was established that the detection step is to determine the balance of information effects on the navigator and his individual polar reactions. The cycle of updating the navigator model is determined by analyzing his individual behavior model of previous intellectual activity. A formal description of the space of alternatives and reactions of the navigator in the form of polar groups at the moment of vessel management is proposed. Software has been developed that allows the analysis of the vessel's passage trajectory for collision detection and the identification of periods of occurrence of the detection threshold of the navigator.

Analysis of the trajectories made it possible to conclude that before the collision the navigator was in active/passive polar states of action, which directly proportional to the speed of the vessel, which confirms the main hypothesis of the study. As a mathematical tool for solving the problem of classifying individual reactions of the navigator, the factor analysis and a training sample are offered – more than nine typical situations, which make it possible to adequately determine polar reactions according to the principle of utility.

Results. In order to confirm the adequacy of the proposed formal-logical approaches, an experiment was conducted using the Trainer Professional 5000 navigation simulator (NTPRO 5000). The results of the experiment, as well as the developed software, made it possible to identify the time periods of the negative human factor manifestation of the navigator caused by the information overload and to determine its individual stimulus factors. At the same time, the moment of occurrence of an extraordinary situation was determined by analyzing the passage trajectory of the vessel by means of processing log files by passing the Bosporus strait location.

In addition, an algorithm was developed for the formation of the navigator's model and its updating on the basis of individual periods of the negative manifestation of the human factor. The features of the occurrence of informational imbalance between members of the navigation watch in the event of an emergency situation and features of its identification during the passage of the vessel are considered. The obtained results will allow at a qualitatively new level to approach the analysis of the problem of the influence of human factor on the adequate managerial decisions of the navigator.

Conclusions. The proposed formal approaches and the developed software will allow identifying the transition from the controlled adequate state of the navigator to the uncontrolled state with intuitive reactions. The scientific novelty consists in the fact that the developed algorithm of forming a navigator model in a discrete time, which allows to identify its polar reactions during extraordinary situations. The practical significance lies in the fact that the results of the experiment allowed identifying the time periods of the manifestation of the negative human factor of the navigator, caused by the information overload and identifying its individual factors-incentives. Prospects for further research may be the development of software in the form of an expert system defining deviations from a given course during the sea passage, as well as inadequate reactions in the performance of classical maneuvers in case of divergence of ships in constrained areas.

KEYWORDS: human factor, navigator model, detection threshold, emergency situations

ABBREVIATIONS

NTPRO 5000 navigation simulator "Navi-Trainer Professional 5000";

DSS decision support system;

DT detection threshold;

IS information system.

NOMENCLATURE

X_i is a some sets of alternatives for the interaction of DSS with a navigator;

i is the individual index of the navigator;

I is the navigation watch;

n is a members of watch;

Θ_i is a binary relations, are interpreted, as the strengths and weaknesses of the i-th navigator;

R_+^l is the positive orthant of the Euclidean space;

l is the number of factors;

B is the set of admissible distributions;

Ω is a fixed set of factors;

© Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15

$t_i(x)$ is a bipolar utility function representing;

Q_i is a preference of the *i*-th navigator;

u_i is a utility function;

γ_i is a a certain threshold DT;

θ is a not random parameter of the classification criterion;

U is a monotonic function in time for both classes;

ρ is the distances between the elements;

$\mathbb{R}^1$ is the linear normalized spaces of real numbers;

Zp is the registration point of the response;

P is a certain probability;

G_1, G_2 is a two regions for dividing the entire space;

C is a losses in the classification;

N is the sample size;

V is the residual component;

M is a correction factor;

*T** is a signal of the system;

$\{F\}$ is a space with a certain probability **P**.

INTRODUCTION

Practice shows that the readiness status of navigator to make management decisions is described by two interdependent areas – some allowable distribution of influencing factors and warning signals of the DSS. It also takes into account the usefulness of the navigator when making decisions in certain situations. The warning signals of the information system of decision support are formed in such a way as to level the threats posed by relatively most influenced factors of navigators.

This article investigate human factor, namely the moment of transition from the conscious condition of the navigator to the intuitive state, individual factors affecting this process, as well as the analysis of the human factor of the navigator for the usefulness of its actions.

The object of the study is the process of identifying manifestations of the human factor in marine transport.

The subject of the study is a model and information system for reducing the time of identification of the negative impact of the human factor in the management of the vessel.

The purpose of the study is to determine the approaches and construction of software tools, to identify the periods of manifestation of the human factor of navigators during extraordinary situations.

1 PROBLEM STATEMENT

It is known that the moment of transition to an intuitive state depends on the intensity of incoming information factors and their nature, after that an DT occurs. This DT leads to the navigator moving to intuitive, unconscious actions. The task of the DSS to not disturb the balance of distribution of the information between members of the navigation watch, using tools both for tracking incoming signals and forecasting possible emergency situations (Fig. 1).

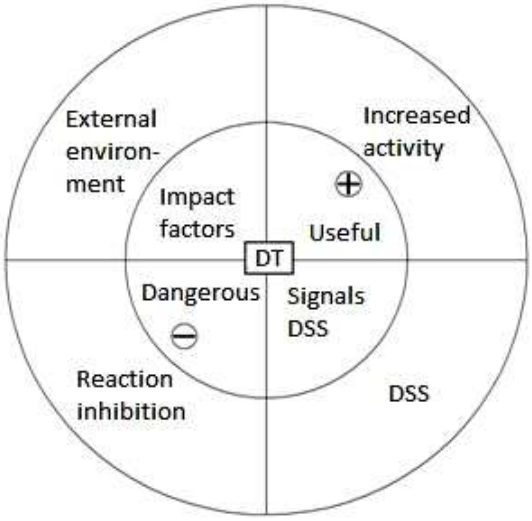


Figure 1 – The balance of information effects on the navigator

The external environment maximizes the utility of members of the navigation watch. If, in a certain condition, the captain and/or members of the navigation watch are meet with DT, the usefulness of actions can be increased by IS due to the redistribution of information factors.

The functions of DSS are summarized as there is no complete conviction about how the situation will develop in the near-threshold area of transition to the intuitive state, therefore this approach method requires a repeatedly experiment.

This will make it possible to clarify the individual causal relationships which lead navigators into the danger zone.

Therefore, it is necessary to solve a number of the following tasks:

1. To determine the dependence of intuitive behavior, as a reaction, on exceeding the detection threshold of perception of official information. Develop an algorithm for the formation of the navigator model, which will allow determining the time of occurrence of reactions leading the navigators in the danger zone.

2. To determine in analytical form an individual set of parameters of the navigator $x = (x_i) \in X$ and his critical information load $x_i = (x^1, ..., x^l)$ in the form of factors l for the purpose of distribution among members of the navigation watch $I = \{1,2,...,n\}$ when an emergency situation occurs.

3. Identify the moment of imbalance $x \in B$ on the basis of comparing the preferences of the navigator Θ_i and the resulting bipolar utility function $t_i(x)$, which will allow to determine the non-random distributions $x = (x_i) \in B$ that allow to classify the situation.

4. To determine the cycle of updating the navigator's model $i \in I$ by analyzing his individual behavior model in the form of thresholds $\{\gamma_i\}$ and reactions $X_i \subset R_+^l$.

© Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15

5. Develop software that allows analyzing the vessel's passage trajectory for collision detection and identifying the time range of occurrence of the navigator's detection threshold.

6. To conduct an experiment, as well as processing of data from log files on the executive route planning and passage of the Bosporus strait location using the NTPRO 5000 navigation simulator, in order to classify different behaviors of the navigator.

7. Determine the formal approaches to classifying polar individual reactions of the navigator according to the principle of utility.

Thus, the implementation of the proposed tasks will allow build an information system for identifying the detection threshold of the navigator, which will significantly reduce the negative effects of the human factor on maritime transport.

2 LITERATURE REVIEW

Many well-known sources cite various studies related to the negative manifestation of the human factor in maritime transport [1, 2, 15].

However, many approaches give recommendations that do not allow to accurately identify the moment of the navigator's transition to a stressful state, from logically justified actions to difficult-to-control [9–11]. At the same time, the relationship between the large information flow and the navigator's fatigue leading to catastrophic situations [4, 7] is clearly defined.

In the course of investigations into many accidents, the authors note that there are a large number of causes of the negative manifestation of the human factor that are difficult to prevent [3, 5, 8, 12].

However, with the advent of navigation information systems, such as Transas ECDIS, it becomes possible to track the negative behavioral patterns of the navigator at an early stage. The use of formal approaches [6, 13], as well as object-oriented programming, will allow a scientific search to be brought closer in a given direction.

3 MATERIALS AND METHODS

To determine the algorithm for finding the most successful reactions, it is expediently to apply a modernized cycle of forming a user model in the process of dialogue interaction (Fig. 2).

The peculiarity of the model formation is that initially it is necessary to set the basic information about the navigator in a formal-logical view, where the most preferable of the possible models for representing knowledge's in terms of artificial intelligence [3]. This information allows forming the knowledge's about complex, nature and intensity of factors affecting each separate navigator to DT. In addition, it is important to track the polarity of intuitive behavior in each of the individual cases in order to predict and prevent possible catastrophes due to the human factor.

Imagine this situation in formal form.

Let X_i be some sets of alternatives for the interaction of DSS with a navigator, i is the individual index of the navigator who is part of the navigation watch $I = \{1,2,...,n\}$ consisting of n members. On each set of X_i, DSS identified binary relations Θ_i are interpreted, as the strengths and weaknesses of the i-th navigator, according to which the DSS compares different alternatives from X_i. If, $X_i \subset R_+^l$ where R_+^l is the positive orthant of the Euclidean space of dimension l, if l is the number of factors, then $x_i \in X_i$ is the vector consisting of the set $x_i = \left(x^1,...,x^l\right)$ of information flows that the i-th navigator receives.

The set of vectors $x = (x_i) \in X$, where $X = \prod_{i \in I} X_i$ is the product of the sets X_i is called the distribution in group I. In this case, the set of admissible distributions will be described with the help of some set $B \subset X$. Then, let

$$B = \left\{ x \in X \middle| \sum_{i=1}^{l} x_i \le \Omega \right\} \quad (1)$$

the set of all redistributions, the total stock of which does not exceed a certain fixed set of factors $\Omega \in R_+^l$

Suppose that when an imbalance $x \in B$ is detected, the i-th navigator meet with some DT, which can be expressed by a real number $t_i(x)$. It can be assumed that each i-th navigator has a preference Q_i on the set of admissible states B, which allows the DSS to compare different states x', $x \in B$ from the point of view of its individual information perception, and $t_i(x)$ is a bipolar utility function representing Q_i. Thus, there is a utility function $u_i(x_i)$ for the preference Θ_i to determine on X_i.

Consider situation when, based on the analysis of the model of an individual navigator $i \in I$, the DSS measure the differentiation of the utility of a certain distribution $x = (x_i) \in B$ using an individual measure of DT, such that:

$$t_i(x) = \sum_{j \in I} \max\left[u_i(x_j) - u_i(x_i), 0\right] \quad (2)$$

The task of the DSS to determine for each navigator $i \in I$ a certain threshold DT $\gamma_i, 0 \le \gamma_i \le 1$. The set of thresholds DT, $\{\gamma_i\} = \gamma$ is interpreted as a set of priorities that are assigned to DSS [14].

Thus, the sequence of actions of the DSS is closed into a loop with each iteration of which the navigator's model is updated and, as a consequence, the change in the threshold of its DT (Fig. 3).

From the above it is clear that the intellectual analysis of the incoming information to the navigator, who makes management decisions at the time of keeping the navigation watch, is possible if to monitor data from all onboard instruments and sensors in real time.

Under the conditions of training practice, it becomes possible to process such data according to a number of criteria that are generated on the server of the NTPRO 5000 (Fig. 4).

DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15

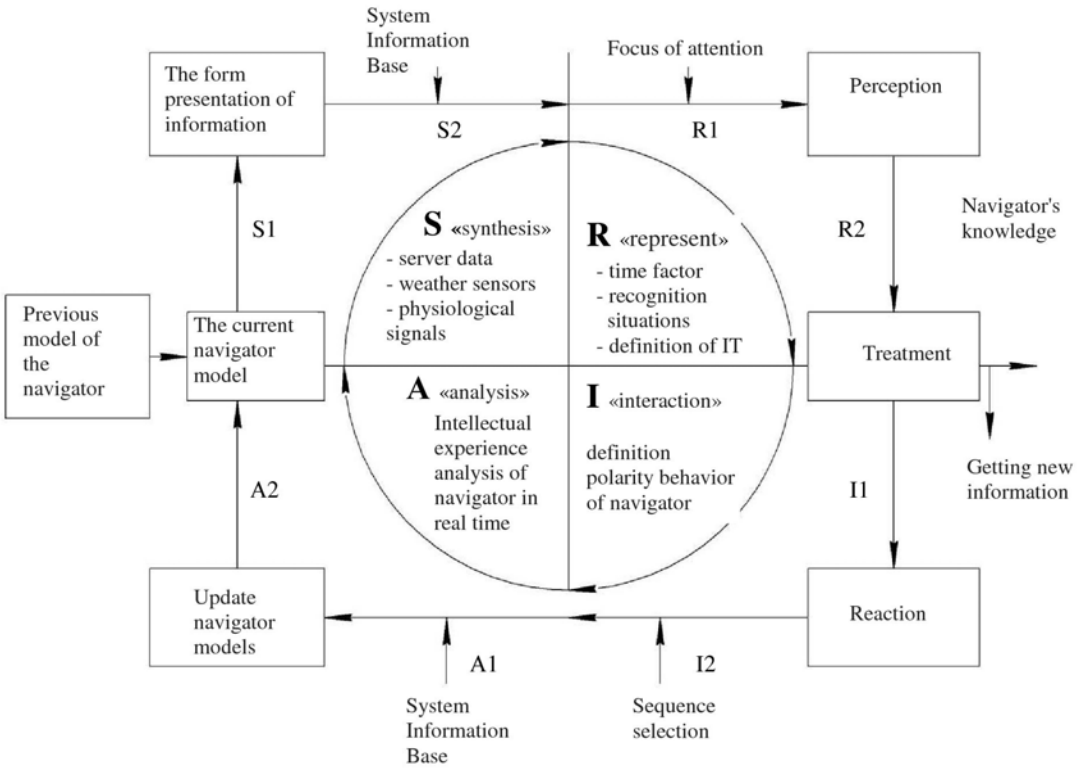


Figure 2 – Algorithm of navigator model formation at discrete-time

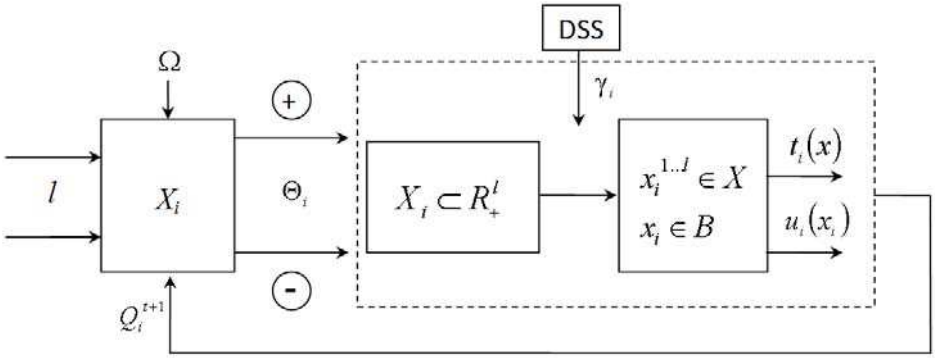


Figure 3 – The cycle of updating the navigator model, taking into account the DT

The task of the DSS to find the threshold of the DT as a period of intellectual behavior of the navigator and the detection of dangerous actions (inactions) leading to disastrous consequences.

In order to convert the server data into a free, relational database management system MySQL, the software and the Microsoft Excel format were developed using the following algorithm (Fig. 5). This software also allows analysis of vessel collision detection in the process of simulator training.

The data analysis after conversion is aimed at detecting both – collisions and the classification of polar reactions caused by the intuitive forms of the human factor demonstration in maritime transport.

The task is complicated by the fact that the classification criterion is established and not available for direct measurement by the random parameter θ of the influence function on the studied situation.

In connection with the indicated complexity, an algorithm is proposed for solving this problem on the basis of a priori data on classes of features that are not available for direct measurement (indirect evidence).

Considering that the solution of the classification problem involves the application of a mathematical model of the studied erratic system, it is required to evaluate the truth of the conclusion obtained on the basis of experimental data.

One of the typical tasks of classification is to determine the affiliation of the intuitive behavior of the navigator in conditions to one of the polar groups. Thus, the group with the "+" sign is responsible for overactive, spontaneous reactions and the group with the "–" sign, for the absence of reactions due to the sharp inhibition of the nervous system. The polar groups of the navigator arise as reactions to the stressful situation caused by the information overload during the execution of complex maneuvers.

© Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15

Own ship CC 1 (Bulk carrier 8 (Dis.1087t))
Time interval: 00:00:00 - 00:47:53; Step - 00:00:01

TIME	LAT LON	COG SOG	HDG LOG	SET DRIFT	SPD F SPD A	RUD ROT	RPM L RPM R	PITCH L PITCH R	THR B THR S
-	- -	° уз	° уз	° уз	уз уз	° °/min	- -	- -	% %
00:00:00	41°15.08N 029°07.94E	171 0.021	192 0.020	101 0.0	-0.007 -0.007	0 0.00	73 -	0 -	0 -
00:00:01	41°15.08N 029°07.94E	172 0.023	192 0.021	101 0.0	0.010 -0.025	0 0.00	73 -	0 -	0 -
00:00:02	41°15.08N 029°07.94E	171 0.022	192 0.021	101 0.0	0.007 -0.023	0 0.00	73 -	0 -	0 -
00:00:03	41°15.08N 029°07.94E	172 0.024	192 0.023	101 0.0	0.005 -0.022	0 0.00	73 -	0 -	0 -
00:00:04	41°15.08N 029°07.94E	171 0.025	192 0.023	101 0.0	0.007 -0.025	0 0.00	73 -	0 -	0 -

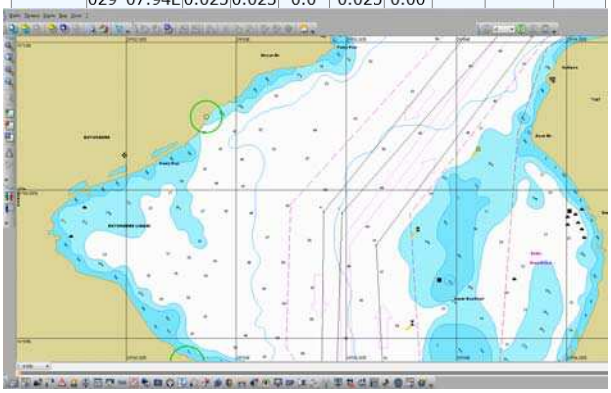


Figure 4 – Data from the NTPRO 5000 server with sampling accuracy – 1 sec

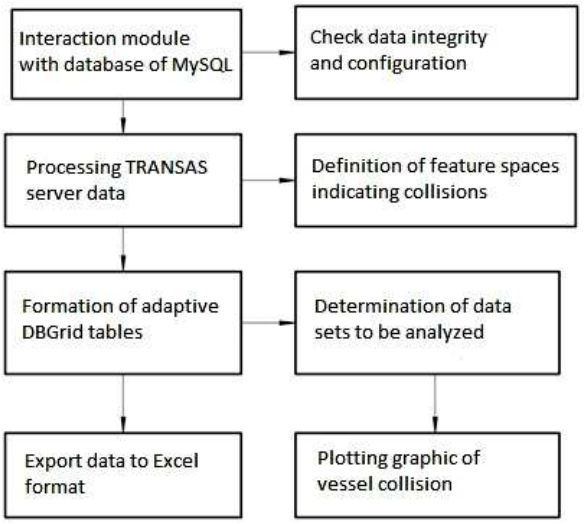


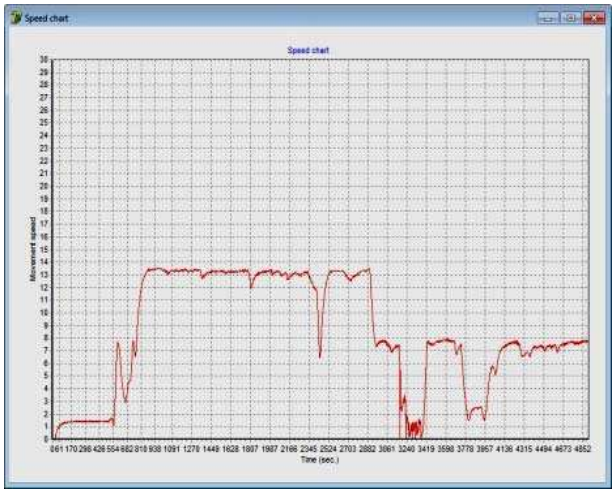
Figure 5 – Algorithm for converting and analyzing server data

4 EXPERIMENTS

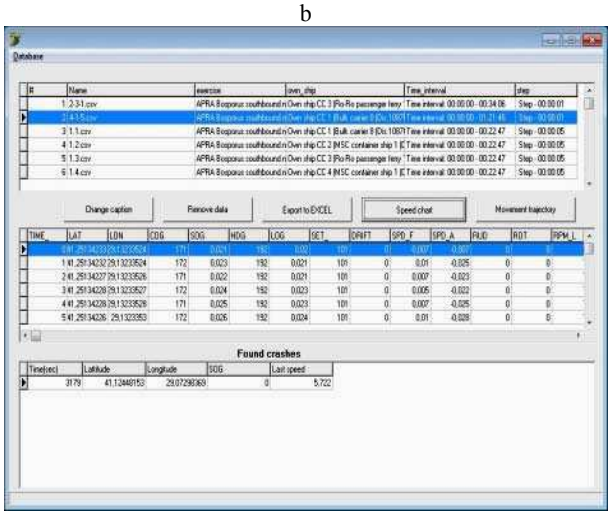
In the course of the experiment and automated data processing of log files for passage planning and passing the Bosporus Strait location on the NTPRO 5000 simulator, the following graphs were found indicating various behavioral patterns of the navigator (Fig. 6–8a–c).

So using the approaches of automated expert assessment based on the analysis of the trajectory of the vessel's speed, we can conclude that the situation most often manifests itself when the navigator noticed an obstacle, but did not cope with control (Fig. 6a) or did not notice an obstacle at all (Fig. 7a). The smooth passage of the location characterizes the graph presented in Fig. 8a. The developed software also records the collision in time, latitude and longitude, allowing collecting statistics of the most dangerous areas during the passage of the location (Fig. 6–8 b–c).

a



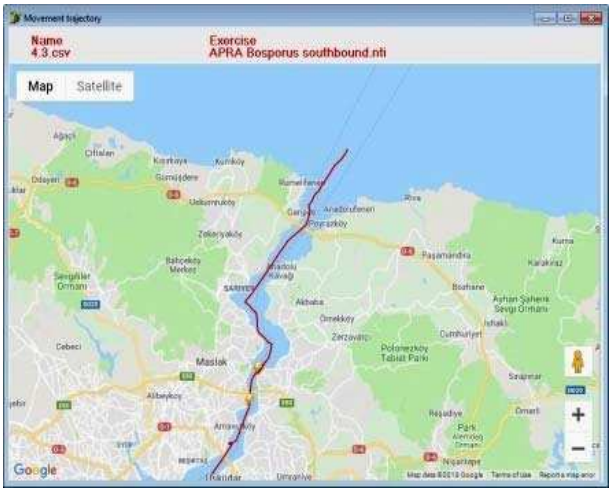
b



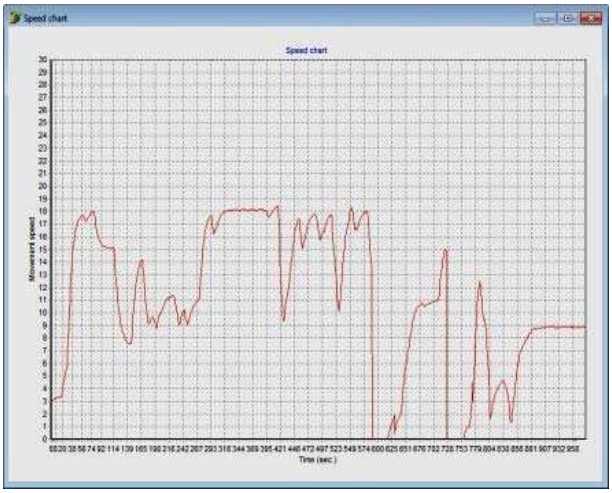
c

Figure 6 – The vessel's collision with one objects (stable speed): a – navigator noticed an obstacle, but did not cope with control; b – graph of vessel speed when an obstacle is detected; c – vessel collision identification databasebut loss of control

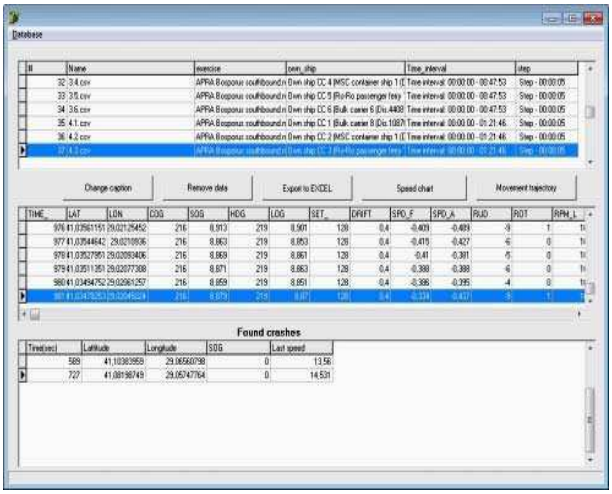
© Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15



a

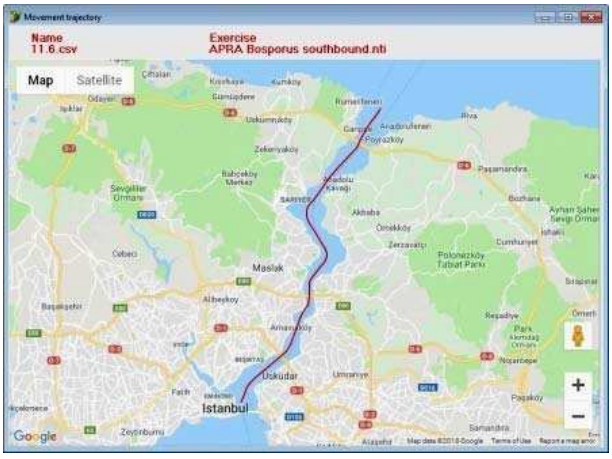


b

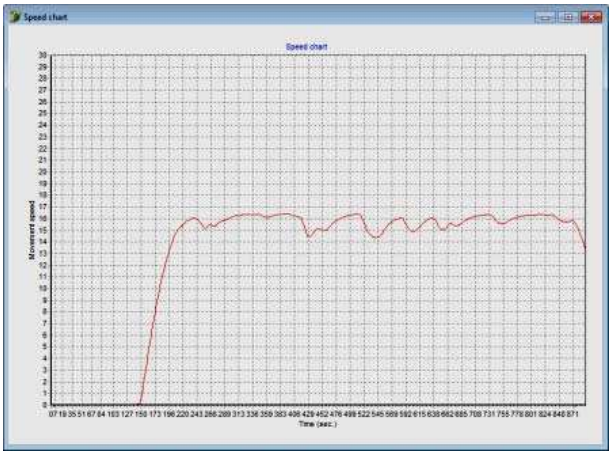


c

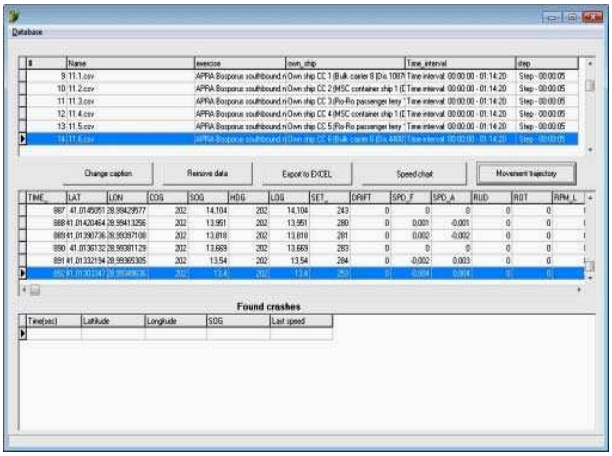
Figure 7 – The vessel's collision with two objects (non stable speed):
a – navigator did not notice an obstacle at all; b – vessel speed chart at the time of loss attention; c – double collision identification database



a



b



c

Figure 8 – No vessel's collision:
a – navigator smooths passage of the location; b – smooth vessel speed chart; c – non collision identification database

Let's describe each case:

At trial exercise Fig. 6 all looks that navigator feels uncertain but with not much influence of stress and situation almost always looks under control.

Long time navigator proceeds with very slow speed around 1.5 knots (0–554 sec). After that rapidly and often change speed till 810 sec.

© Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15

From 810 sec till 2345 sec and from 2524 sec till 2882 sec vessel passage mostly stable (except between 2345–2524 sec where vessel speed down twice – from 13.0 knots till 6.5 knots). From 2882 sec navigator met circumstances which brought to extremely speed reduction till 5.722 knots and finally to collision at 3179 sec. After vessel collision the trial passage has been continue but behavior and actions of navigator was very uncertain till the end of exercise. As we can see the navigator detect obstruct in time but did not react properly at this dangerous situation.

At trial exercise Fig. 7 we can see that navigator show himself as certain and much bolded due to all time wish proceed with high vessel speed 17.0–18.0 knots (which is much over maximum acceptable at Bosporus passage) and very often speed and courses alteration. Such kind of high speed brought till often major speed reductions as final till vessel collisions at 589 sec (speed 13.56 knots) and at 727 sec (speed 14.531 knots). After collisions the trial passage continues again with same navigator behavior. In this particular case navigator even did not determine risk of collision due to vessel high speed and bolded behavior. When analyzing the trajectory presented in Fig. 7, it can be concluded that the navigator (bridge team) was unsure of their actions, and as a result, the speed and courses of the vessel changed, indicating an increased stress situation on the bridge.

At trial exercise Fig. 8 navigator show himself as certain considering the average passage speed was around 16.0 knts which is over maximum acceptable at Bosporus Strait. However all the time trial passage was stable and looks stress free with some speed deviation due to vessel courses alteration.

5 RESULTS

Into comparing all trial exercises need to say that best results shown when certain behavior of navigator has background as good knowledge's and experience which can be achieved by using of DSS also. The lowest speed did not guaranty safe passage but gives more time to determine obstruct and take final and right decision but not bring vessel into safe navigation due to it is group of different factors to avoid and prevent collision.

When solving the problem of classification, temporary indicators of the activity of the navigator at the workplace, the direction of sight and movement along the bridge in situations requiring certain behavioral patterns can serve as an immeasurable classification feature θ.

In the general case, it can be stated that the behavior of the navigator during a stressful situation is described by a random sequence $\theta(t)$, which makes it possible to apply the discriminant analysis method. Consequently, there is a one-dimensional probability distribution density $f(\theta)$, where θ the non-random function and does not depend on *t*.

In order to solve the problem, it is necessary to determine the value of the classification sign and compare them with the values corresponding to the standards of the studied polar classes.

This article defines the values of the information load on the navigator and, the result of which changes in response to information factors (arousal or inhibition). The construction of a mathematical model is based on the formal connection of the function θ and the information load *u*. Next, it is necessary to solve the model classification problem using the data of a computational experiment. It should be noted that as an input function of the studied system will be considered a stationary random sequence $\theta(t)$, with the $U(\theta,T)$ – corresponding function of the system response to the impact.

To solve the model classification problem, we will consider θ *and* U as elements of the metric spaces $\{X\}$ and $\{F\}$, accordingly, with the distances between the elements $\rho_{\{X\}}(\theta_1,\theta_2)$, $\rho_{\{F\}}(U_1,U_2)$, θ_1, $\theta_2 \in \{X\}, U_1, U_2 \in \{F\}$. The spaces $\{X\}$ and $\{F\}$ are linear normalized spaces IR^1 of real numbers i.e.

$$\rho_{\{F\}}(U_1,U_2) = \|U_2 - U_1\| =$$
$$|U_2 - U_1|, \rho_{\{X\}}(\theta_1,\theta_2) = \|\theta_2 - \theta_1\|.$$

At the same time, the condition of the correctness of the task of distinguishing values θ by the known values of U corresponding to them is identical to the condition of the correctness of the task of finding a "solution" θ from the known "initial data" U:

$$\theta = FU \qquad (3)$$

if the conditions are met that the range of values of the set $\{\theta\}$ will always lie on one side of the registration point *Zp* of the response, and the time of registration of the signal *T** is selected on the interval, where U is a monotonic function in time for both classes. Then the following conditions must be met: the mapping $\{\theta\} \to \{U\}$, where $\{\theta\} \subset \{X\}$, $\{U\} \subset \{F\}$; $\{\theta\}$ – domain of definition, a limited set on the numerical line IR^1.

At this stage, the problem of classification is solved in space $\{F\}$ with a certain probability **P**. The choice of a classification rule is reduced to choosing a method for dividing the entire space of possible values of U into two regions G_1 and G_2. But there are losses in the classification, and they are equal to C (1/2) and C (2/1). These losses can be large and not satisfy the researcher.

To increase the likelihood of correct classification, apply the method factor analysis. A prerequisite for the application of this method is the fact that $U_1, U_2, \ldots, U_N$, where **N** is the sample size, are elements of the same population. The mathematical expectation as a numerical characteristic of this distribution, which does not vary with time, is a common factor for a sample of $U_1, U_2, \ldots, U_N$. Then any value of U can be represented as $U = \mathbf{M}U + V$, where V is the residual component,

$$\mathbf{M}U_1 \int_{G_1} U_{\rho_1}(U)dU \text{ for class 1,}$$

© Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15

$$\int_{G_2} \rho_1(U)dU = 1,$$

$$\mathbf{M}U_2 \int_{G_2} U_{\rho_2}(U)dU \text{ for class 2,}$$

$$\int_{G_2} \rho_2(U)dU = 1,$$

where $\rho_1(U) = Gf_1(U)$, $\rho_2(U) = Gf2_1(U)$, $G = (dU/d\theta)^{1/2}$ is the Jacobian transformation for the probability density at the transition $\{\theta\}$ *to* $\{U\}$.

If $\mathbf{M}U_1 \neq \mathbf{M}U_2$, then, having determined the values of common factors for both classes, it is possible with **P** = 100% to talk about which class the observed factors U_1, U_2,…, U_N belong to. Thus, as a result of the application of factor analysis, we solve the problem of classification by a sign MU in space $\{F\}$ with probability **P** = 100% for $N \to \infty$.

Thus, if in the space $\{X\}$ the classification problem is solved with probability **P**, then the problem of classification in space $\{F\}$ is solved with the same probability **P**. True and inverse statement.

Based on this corollary, it can be argued that the classification problem can be solved on the basis of MU and in the space $\{X\}$ with the same probability **P** = 100% for $N \to \infty$. Turning to the mathematical expectation as a more informative classification feature, we minimize the losses in the classification: *C (1/2) = C (2/1)* = 0. But in practice we get an empirical average. The point estimate of the mathematics expectation value for large $N(N \geq 10)$ will be calculated by the formula: $\langle U \rangle = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_1$.

Thus, the proposed formal classification mechanism by the most significant classification parameter is adequate and supported by experimental data. An important step in the preliminary modeling is the accurate diagnosis of the stimulus factors “including” one of the two polar reactions of navigator’s at the time of a stressful situation.

6 DISCUSSION

Experimental data give reason to believe that there is a division into two polar classes of behavior of navigators. That confirms the feasibility of the study and the developed software application.

Analysis of the execution of the route planning and the direct passage by many navigation watch crews among the cadet staff by means of the NTPRO 5000 training center at the KSMA showed that the behaviors model of the navigators differ depending on their individual perception of input information.

Experience shows that the skills and behavioral patterns developed during training practice are inherited during real passages in unfamiliar locations. The developed approaches, classification mechanisms and software have been introduced into the work of the KSMA training center in order to develop optimal behavioral models of navigators during emergency situations, which will prevent the negative manifestations of the human factor in real conditions.

The basic principles and research were discussed at the 10th International scientific and practical conference Modern Information and Innovation Technologies in Transport MINTT–2018 [16].

The introduction of software will allow quickly and efficiently process large amounts of data and highlight the classification signs of the negative manifestation of the human factor, both among cadets and experienced seafarers during traineeships and advanced training in accordance with the standards of IMO and STCW 78/85. In the future, further research is planned to develop software, in the form of an expert system that determines deviations from a given course during the passage, as well as inadequate reactions when performing classical maneuvers when vessels diverge in constrained areas.

CONCLUSIONS

The results of the experiment using the NTPRO 5000, as well as the developed software, allow identifying the time periods of manifestation of the negative human factor of the navigator. The identification is based on the definition of information overload and as a result of imbalance. For the unification of the identification process, an algorithm was developed for forming the navigator model and updating it.

The solved task, which consists in the construction of a model and software for identifying periods of occurrence of the detection threshold of a navigator during extraordinary situations and allows to significantly increase safety in marine transport.

The scientific novelty consists in the fact that the developed algorithm of forming a navigator model in a discrete time, which allows to identify its polar reactions during extraordinary situations. The algorithm takes into account the recursive updating of the model and differs from the existing by taking into account the detection threshold of the navigator.

The practical significance lies in the fact that the results of the experiment, as well as the developed software, allowed identifying the time periods of the manifestation of the negative human factor of the navigator, caused by the information overload and identifying its individual factors-incentives. At the same time, the moment of the occur of a emergence situation was determined by analyzing the navigation trajectory of the vessel by means of processing log-files of the server on the passage of the location “Bosphorus”, “Dardanell” and others.

Prospects for further research will be aimed at building the classification of sets of navigator reactions at the time of their performing maneuvers and operations which leading to negative manifestations of the human factor in conditions of information overload.

© Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is carried out within the framework of "Creation of high-accuracy intellectual systems for military-oriented and commercial ship's navigation" (state registration number 0117U002176), of navigation and ECDIS departments of Kherson State Maritime Academy Navigation Faculty (scientific adviser: PhD Associate Professor, Deputy Rector for scientific and pedagogical work, Head of the Navigation and Electronic Navigation Systems Department, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, Ben A. P.).

REFERENCES

1. Ben' A. P. Lyuds'kiy faktor v avtomatizovanikh sistemakh upravlinnya sudnom ta shlyakhi znizhennya yogo vplivu. *Naukoviy visnik Khersonskoy derzhavnoy morskoy akademii,* 2012*,* 2(7). pp. 26–30 (in Ukrainian).
2. Kosenko Y. I., Roslyakova S. V., & Nosov P. S. Sistema identifikatsii funktsional'noi entropii sub'ekta kritichnoi infrastrukturi. *Zbirnik nauchnykh trudov po materialam mizhnarodnoi naukovoi praktichnoi konferencii «Sovremennye napravleniya teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniy», Tekhnicheskie nauki,* 2013, 8, pp. 50–54 (in Ukrainian).
3. Xi Y. T., Yang Z. L. , Fang Q. G., Chen W. J., & Wang J. A new hybrid approach to human error probability quantification-applications in maritime operations, *Ocean Engineering,* 2017, Vol. 138, pp. 45–54. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.04.018.
4. Arslan O., & Er I. D. Effects of Fatigue on Navigation Officers and SWOT Analyze for Reducing Fatigue Related Human Errors on Board TransNav, *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2007, Vol. 1, No. 3, pp. 345–349.
5. Dixena D., Chakraborty B., & Debnath N. Application of Case-Based Reasoning for Ship turning Emergency to prevent Collision, *9th IEEE International Conference on Industrial Informatics INDIN*, 2011.
6. Jech T. Set theory. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London, Milan, Paris, Santa Clara, Singapore, Tokyo, Springer, 1997. DOI: 10.1007/3-540-44761-X.
7. Özdemir Ü., & Güneroğlu A. Strategic approach model for investigating the cause of maritime accidents, *Promet – Traffic – Traffico, Karadeniz Technical University,* 2015, 27(2), pp. 113–123. DOI: 10.7307 / ptt.v27i2.1461.
8. Carotenuto A., Angiola M. F., Ivana M., Sibilio F., Saturnino A., Traini E., & Amenta F. The Psychological General Well-Being Index (PGWBI) for assessing stress of seafarers on board merchant ships, *International Maritime Health*, 2013, 64(4), pp. 215–220. DOI: 10.5603/IMH.2013.0007.
9. Yang C., Gao J., Du J., Wang H. Y., Jiang J. X., & Wang Z. G. Understanding the outcome in the chinese changjiang disaster in 2015: a retrospective study, *Journal of emergency medicine,* 2017, 2(52), pp. 197–204. DOI: 10.1016/ j.jemermed. 2016.08.013.
10. Zhang L., Lu J., & Ai Y. Analyzing human error in maritime transportation in China based on game theory, *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering),* 2014, 38(6), pp. 1282–1290. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844. 2014. 06.022.
11. Berg H. P. Human Factors and Safety Culture in Maritime Safety, *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2013, 7(3), pp. 343–352. DOI: 10.12716/1001.07.03.04.
12. Guidance notes on safety culture and leading indicators of safety. *American Bureau of Shipping (ABS), Houston,* 2012, 74 p.
13. Corović B. Research of Marine Accidents through the Prism of Human Factors, *Promet Traffic & Transportation,* 2013, Vol. 25, No. 4, pp. 369–377. DOI: 10.7307/ ptt.v25i4.1210.
14. Jech T. Set theory. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London, Milan, Paris, Santa Clara, Singapore, Tokyo, Springer, 1997. DOI: 10.1007/3-540-44761-X. (in English).
15. Hyun C. L., & Poong H. S. A computational model for evaluating the effects of attention, memory, and mental models on situation assessment of nuclear power plant operators, *Reliability Engineering & System Safety,* 2009, Vol. 94, Issue 11, pp. 1796–1805. DOI: 10.1016/ j.ress.2009.05.012.
16. Nosov P. S., Ben A. P., & Safonov M. S. Model construction of individual scenarios for the elimination of the human factor, *Suchasni infonmaciyni ta innovaciyni tehnologii na transposti, MINTT-2018: Materialy X Miznarodnoi naukovo-praktichnoyi konferencii*, 29–31 May 2018, pp. 224–225 (in Ukrainian).

Received 16.10.2018.
Accepted 27.12.2018.

УДК 004.942:316.454.54

ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДІВ ПРОЯВУ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА СУДНОВОДІЇВ ПІД ЧАС ПОЗАШТАТНИХ СИТУАЦІЙ

Носов П. С. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри судноводіння та електронних навігаційних систем Херсонська державна морська академія, Україна.

Бень А. П. – канд. техн. наук, доцент, заступник ректора з науково-педагогічної роботи, завідувач кафедри судноводіння та електронних навігаційних систем, Херсонська державна морська академія, Україна.

Сафонова А. Ф. – канд. техн. наук, доцент, Херсонський політехнічний коледж, Україна.

Паламарчук І. В. – капітан далекого плавання, аспірант, Херсонська державна морська академія, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглядається проблема ідентифікації проявів людського фактору у контексті корисності на морському транспорті під час позаштатних ситуацій. Метою дослідження є підвищення безпеки на морському транспорті засобами ідентифікації позитивного і негативного людського фактора, а також аналізу поведінкових реакцій що впливають на параметри переходу судна.

Мета. Метою роботи є визначення підходів і побудови програмних засобів, для ідентифікації періодів прояву людського фактора судноводіїв під час позаштатних ситуацій.

Метод. В рамках дослідження визначені види прояву людського фактора у формі інтуїтивної (нелогічної) поведінки судноводія. Наводиться залежність інтуїтивної поведінки, як реакції, що залежить від перевищення інформаційного порогу

© Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15

сприйняття службової інформації. Визначено, що розподіл інформаційного навантаження між членами вахтової служби істотно знизить інформаційний поріг судноводія в момент прийняття управлінських рішень. Встановлено, що етапом ідентифікації є визначення балансу інформаційних впливів на судноводія і його індивідуальних полярних реакцій. Визначено цикл поновлення моделі судноводія за допомогою аналізу його індивідуальної моделі поведінки попередньої інтелектуальної діяльності. Запропоновано формальний опис простору альтернатив і реакцій судноводія у вигляді полярних груп в момент управління судном. Розроблено програмне забезпечення, що дозволяє виконувати аналіз траєкторії управління судном на предмет виявлення зіткнень і ідентифікувати періоди виникнення інформаційного порогу судноводія. Аналіз траєкторій, дозволив зробити висновок, що судноводій перед зіткненням знаходився в полярних на предмет активності станах активний / пасивний, що прямо-пропорційно відбивалося на швидкості ходу судна, що підтверджує основну гіпотезу дослідження. У якості математичного апарату для розв'язання задачі класифікації індивідуальних реакцій судноводія запропоновано факторний аналіз і навчальна вибірка – більш ніж дев'ять типових ситуацій, що дозволяє адекватно визначати полярні реакції за принципом корисності.

Результати. З метою підтвердження адекватності запропонованих формально-логічних підходів був проведений експеримент із застосуванням навігаційного тренажера Trainer Professional 5000 (NTPRO 5000). Результати експерименту, а також розроблене програмне забезпечення дозволили ідентифікувати тимчасові періоди прояву негативного людського фактора судноводія, викликані інформаційним перевантаженням і визначити його індивідуальні фактори-стимули. При цьому, момент виникнення позаштатної ситуації визначався шляхом аналізу траєкторії управління судном засобами обробки log-файлів серверу по проходженню локації «Босфор».

Крім того, був розроблений алгоритм формування моделі судноводія і її поновлення на основі індивідуальних періодів негативного прояву людського фактора. Розглянуто особливості виникнення інформаційного дисбалансу між членами вахтової служби при виникненні позаштатної ситуації і особливостей його ідентифікації під час переходу судна. Наведені результати дозволять на якісно новому рівні підійти до аналізу проблеми впливу людського фактора на адекватні управлінські рішення судноводія.

Висновки. Запропоновані формальні підходи дозволять ідентифікувати перехід від контрольованого адекватного стану судноводія до неконтрольованого стану з інтуїтивними реакціями. Наукова новизна полягає в тому, що вперше розроблений алгоритм формування моделі судноводія у дискретному часі, що дозволяє ідентифікувати його полярні реакції під час позаштатних ситуацій. Практична цінність полягає у результатах експерименту, що дозволили ідентифікувати часові періоди прояву негативного людського фактора судноводія. Перспективами подальших досліджень може бути розробка програмного забезпечення у вигляді експертної системи для визначення відхилень від заданого курсу під час переходу, а також неадекватних реакцій при здійсненні класичних маневрів при розбіжності судів в обмежених районах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: людський фактор, модель судноводія, інформаційний поріг, позаштатні ситуації.

УДК 004.942:316.454.54

ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПЕРИОДОВ ПРОЯВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА СУДОВОДИТЕЛЕЙ ВО ВРЕМЯ ВНЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ

Носов П. С. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судовождения и электронных навигационных систем Херсонская государственная морская академия, Украина.

Бень А. П. – канд. техн. наук, доцент, заместитель ректора по научно-педагогической работе, заведующий кафедрой судовождения и электронных навигационных систем, Херсонская государственная морская академия, Украина.

Сафонова А. Ф. – канд. техн. наук, доцент, Херсонский политехнический колледж, Украина.

Паламарчук И. В. – капитан дальнего плавания, аспирант, Херсонская государственная морская академия, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассматривается проблема идентификации проявления человеческого фактора в контексте полезности на морском транспорте во время внештатных ситуаций. Целью исследования является повышение безопасности на морском транспорте посредствам идентификации позитивного и негативного человеческого фактора, а также анализа поведенческих реакций влияющих на параметры перехода судна.

Цель. Целью работы является определение подходов и построение программных средств, для идентификации периодов проявления человеческого фактора судоводителей во время внештатных ситуаций.

Метод. В рамках исследования определены виды проявления человеческого фактора в форме интуитивного (нелогичного) поведения судоводителя. Приводится зависимость интуитивного поведения, как реакции, от превышения информационного порога восприятия служебной информации. Определено, что распределение информационной нагрузки между членами вахтенной службы существенно снизит информационный порог судоводителя в момент принятия управленческих решений. Установлено, что этапом идентификации является определение баланса информационных воздействий на судоводителя и его индивидуальных полярных реакций. Определен цикл обновления модели судоводителя посредством анализа его индивидуальной модели поведения предшествующей интеллектуальной деятельности. Предложено формальное описание пространства альтернатив и реакций судоводителя в виде полярных групп в момент управления судном. Разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять анализ траектории управления судном на предмет обнаружения столкновений и идентифицировать периоды возникновения информационного порога судоводителя. Анализ траекторий, позволил сделать вывод, что судоводитель перед столкновением находился в полярных на предмет активности состояниях активен/пассивен, что прямо-пропорционально отражалось на скорости хода судна, что подтверждает основную гипотезу исследования. В качестве математического аппарата для решения задачи классификации индивидуальных реакций судоводителя предложен факторный анализ и обучающая выборка – более чем девять типовых ситуаций, позволяющая адекватно определять полярные реакции по принципу полезности.

© Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15

Результаты. С целью подтверждения адекватности предложенных формально-логических подходов был проведен эксперимент с применением навигационного тренажера Trainer Professional 5000 (NTPRO 5000). Результаты эксперимента, а также разработанное программное обеспечение позволили идентифицировать временные периоды проявления негативного человеческого фактора судоводителя, вызванные информационным перегрузом и определить его индивидуальные факторы-стимулы. При этом, момент возникновения внештатной ситуации определялся путем анализ траектории управления судном посредствам обработки log-файлов по прохождению локации «Босфор».

Кроме того был разработан алгоритм формирования модели судоводителя и ее обновления на основе индивидуальных периодов негативного проявления человеческого фактора. Рассмотрены особенности возникновения информационного дисбаланса между членами вахтенной службы при возникновении внештатной ситуации и особенностей его идентификации во время перехода судна. Приведенные результаты позволят на качественно новом уровне подойти к анализу проблемы влияния человеческого фактора на адекватные управленческие решения судоводителя.

Выводы. Предложенные формальные подходы позволят идентифицировать переход от контролируемого адекватного состояния судоводителя к неконтролируемому состоянию с интуитивными реакциями. Научная новизна заключается в том, что впервые разработан алгоритм формирования модели судоводителя в дискретном времени, что позволяет идентифицировать его полярные реакции во время внештатных ситуаций. Практическая ценность заключается в результатах эксперимента, котрые позволили идентифицировать временные периоды проявления негативного человеческого фактора судоводителя. Перспективами дальнейших исследований может быть разработка программного обеспечения в виде экспертной системы определяющей отклонения от заданного курса во время перехода, а также неадекватных реакций при совершении классических маневров при расхождении судов в стесненных районах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: человеческий фактор, модель судоводителя, информационный порог, внештатные ситуации.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Бень А. П. Людський фактор в автоматизованих системах управління судном та шляхи зниження його впливу / А. П. Бень // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2012. – № 2 (7). – С. 26–30.
2. Косенко Ю. І. Система ідентифікації функціональної ентропії суб'єкта критичної інфраструктури / Ю. І. Косенко, С. В. Рослякова, П. С. Носов // Сб. научных трудов по матер. МНПК «Современные направления теоретических и прикладных исследований». – Технические науки. – Одесса : КУПРИЕНКО. – 2013. – Том 8. – С. 50–54.
3. A new hybrid approach to human error probability quantification–applications in maritime operations / [Y. T. Xi, Z. L. Yang, Q. G. Fang et al] // Ocean Engineering. – 2017. – Vol. 138. – P. 45–54. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.018.
4. Arslan O. Effects of Fatigue on Navigation Officers and SWOT Analyze for Reducing Fatigue Related Human Errors on Board TransNav / O. Arslan, I. D. Er // The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2007. – Vol. 1, Number 3. September. – P. 345–349.
5. Dixena D. Application of Case-Based Reasoning for Ship turning Emergency to prevent Collision / D. Dixena, B. Chakraborty, N. Debnath // 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics INDIN. – Lisbon: IEEE – 2011. ISSN: 1935-4576.
6. Jech T. Set theory / T. Jech // Corr. ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hong Kong; London; Milan; Paris; Santa Clara; Singapore; Tokyo; Springer, 1997, P. 243. DOI: 10.1007/3-540-44761-X.
7. Özdemir Ü. Strategic approach model for investigating the cause of maritime accidents / Ü. Özdemir, A. Güneroğlu // Promet – Traffic – Traffico, 2015, Volume 27, Issue 2. – Karadeniz Technical University. – P. 113–123. DOI: 10.7307/ptt.v27i2.1461.
8. Carotenuto, A. The Psychological General Well-Being Index (PGWBI) for assessing stress of seafarers on board merchant ships / [A. Carotenuto, M. F. Angiola, M. Ivana et al.] // International Maritime Health. – 2013. – Vol. 64(4). – P. 215–220. DOI: 10.5603/IMH.2013.0007.
9. Yang C. Understanding the outcome in the chinese changjiang disaster in 2015: a retrospective study / [C. Yang, J. Gao, J. Du et al] // Journal of emergency medicine. – 2017. – № 2 (52) – NY. : Elsevier science Inc, P. 197–204. DOI: 10.1016/j.jemermed.2016.08.013.
10. Zhang L. Analyzing human error in maritime transportation in China based on game theory / L. Zhang, J. Lu, Y. Ai // Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering). – 2014. – Volume 38, Issue 6. – Dalian : Dalian Maritime University. – P. 1282–1290. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2014.06.022.
11. Berg H. P. Human Factors and Safety Culture in Maritime Safety / H. P. Berg // The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 7 , Number 3 , 2013. pp. 343–352. DOI: 10.12716/1001.07.03.04.
12. Guidance notes on safety culture and leading indicators of safety. – [Effective from 01.01.2012]. – Houston: American Bureau of Shipping (ABS), 2012. – 74 p.
13. Corović B. Research of Marine Accidents through the Prism of Human Factors / B. Corović, P. Djurovic // Promet Traffic & Transportation. – 2013. – Vol. 25, No. 4. – P. 369–377.
14. Jech T. Set theory / T. Jech // Corr. ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hong Kong; London; Milan; Paris; Santa Clara; Singapore; Tokyo; Springer, 1997. – P. 243. DOI: 10.1007/3-540-44761-X.
15. Hyun C. L. A computational model for evaluating the effects of attention, memory, and mental models on situation assessment of nuclear power plant operators / C. L. Hyun, H. S. Poong // Reliability Engineering & System Safety, 2009. – Vol. 94, Issue 11. – P. 1796–1805. DOI: 10.1016/j.ress.2009.05.012.
16. Nosov P. S. Model construction of individual scenarios for the elimination of the human factor / P. S. Nosov, A. P. Ben, M. S. Safonov // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті, MINTT-2018: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, 29–31 травня. – Херсон, 2018. – С. 224–225.

© Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-15

УДК 681.391, 621.372

ЕФЕКТИВНЕ ОБЧИСЛЕННЯ ЦІЛОЧИСЕЛЬНОГО ДКП-II ДЛЯ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Процько І. О. – канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних систем і технологій Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Кузьмінський Р. Д. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри експлуатації та технічного сервісу машин Львівського національного аграрного університету, Дубляни, Україна.

Теслюк В. М. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем і технологій Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Забезпечення результативності та багатофункціональності сучасних засобів оброблення візуальної інформації вимагає розробки різноманітних методів ефективного виконання дискретних косинусних перетворнь. Відповідно вимог сучасних відео стандартів, забезпечення високої чіткості стисненої візуальної інформації досягається на основі адаптивно блочно-розмірних перетворень, що потребує ефективних обчислювальних схем виконання дискретних косинусних перетворень змінних обсягів.

Мета роботи – створення узагальненої структурної схеми ефективного обчислення цілочисельного дискретного косинусного перетворення на основі циклічних згорток обсягів рівних цілій степені двійки, що забезпечує низьку обчислювальну складність і можливість застосування в системах стиснення візуальної інформації на основі адаптивно блочно-розмірних перетворень.

Метод. Запропоновано використання твірних масивів для ефективного синтезу алгоритмів та структурних схем обчислення цілочисельного дискретного косинусного перетворення на основі циклічних згорток.

Результати. Підсумком дослідження є розроблення узагальненої структурної схеми виконання цілочисельного дискретного косинусного перетворення обсягів рівних цілій степені двійки для систем стиснення візуальної інформації на основі адаптивно блочно-розмірних перетворень.

Висновки. У проведеному дослідженні застосовано підхід приведення базису цілочисельного дискретного косинусного перетворення до набору циклічних зліва підматриць, що дозволяє обчислювати перетворення на основі циклічних згорток. Основна ідея застосування належного математичного апарату полягає у використанні твірних масивів, що містять стислий опис блочно-циклічної структури базису перетворення. На основі одержаного набору циклічних підматриць ядра перетворення розроблено узагальненну структурну схему ефективного виконання цілочисельного дискретного косинусного перетворення коротких обсягів рівних цілій степені двійки. Обчислення відповідного набору циклічних згорток та об'єднання їх результатів за структурною схемою забезпечує виконання адаптивно блочно-розмірних перетворень для систем стиснення візуальної інформації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: цілочисельне дискретне косинусне перетворення, циклічна згортка, твірний масив, стиснення зображень, адаптивне блочно-розмірне перетворення.

АБРЕВІАТУРИ

AVC – Advanced Video Coding;

AVS – Audio Video Standard;

HEVC – High Efficiency Video Coding;

MPEG – Moving Picture Experts Group;

VC – Video Coding;

АБП – адаптивне блочно-розмірне перетворення;

НВІС – надвелика інтегральна схема;

ПЕ – процесорний елемент;

ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема;

ЦДКП – цілочисельне дискретне косинусне перетворення.

НОМЕНКЛАТУРА

a – кількість операцій додавання для обчислення циклічних згорток;

d_N – матриця коефіцієнтів нормування;

$H(n)$ – твірний масив;

$H_i(n_i)$ – твірний підмасив;

IC_{NxN} – матриця цілочисельного ядра дискретного косинусного перетворення;

m – кількість операцій множення для обчислення циклічних згорток.

N – обсяг дискретного косинусного перетворення;

$x(n)$ – вхідна послідовність дискретного косинусного перетворення;

$X_N^{c2}(k)$ – вихідна послідовність дискретного косинусного перетворення.

ВСТУП

Широке використання статичних та динамічних даних візуальної інформації потребує значних об'ємів інформації та часу для їх зберігання та опрацювання. Так в аграрній промисловості проводяться детальні фотографування великих територій сільськогосподарських угідь в різні проміжки часу для аналізу ходу сільськогосподарських робіт, стану росту урожаю, проведення оранки та інше [1]. Ці значні об'єми відеоданих документуються, обробляються, захищаються, що потребує відповідних засобів для об'єктних і бортових систем сільськогосподарської техніки.

Застосування комплексу ефективних алгоритмів обробки стиснення, кодування та шифрування вхід-

© Процько І. О., Кузьмінський Р. Д., Теслюк В. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-16

них потоків даних забезпечує підвищення швидкодії формування та передавання інформаційно-комунікаційними системами компактних, захищених пакетів достовірної і точної інформації. Завдяки ефективним алгоритмам, зі значним зменшенням обчислювальних затрат, досягається зменшення інформаційного об'єму представлення візуальної даних [2]. Методи стиснення зображень базуються на модифікації й усіченні результатів дискретного перетворення. Найкращим засобом стиснення реальних зображень, при наближенні коефіцієнта кореляції до одиниці, є дискретне косинусне перетворення. Стандартом ISO IEC затверджено вісім типів ДКП I-VIII. Використання ДКП в алгоритмах стиснення зображень мінімізує блочні спотворення, забезпечує лінійність фази та інше. В сучасних відеостандартах H.264/MPEG-4 AVC, VC-1, AVS [3], H.265(HEVC) [4] перевагу віддають застосуванню швидких алгоритмів ДКП-ІІ другого типу [5].

Об'єктом дослідження є процес розробки узагальненої структурної схеми ефективного обчислення цілочисельного дискретного косинусного перетворення на основі циклічних згорток для коротких обсягів рівних цілій степені двійки.

Предметом дослідження є структури з набором циклічних підматриць цілочисельного ядра дискретного косинусного перетворення обсягів рівних цілій степені двійки.

Метою роботи є ефективне використання блоків виконання циклічних згорток в структурній схемі виконання адаптивно блочно-розмірних перетворень для систем стиснення зображень.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай задано стислий опис $IC_{N\text{x}N}$ матриці цілочисельного ядра ДКП-ІІ у виді твірного масиву $H(n)$ для значення обсягу перетворення N у вигляді [6]

$$H(n) = H_1(n_1)\, H_2(n_2) \ldots H_k(n_k), \qquad (1)$$

де k – число твірних підмасивів, n – обсяг масиву, який рівний n=2N–1.

Задача побудови узагальненої структурної схеми виконання цілочисельного дискретного косинусного перетворення обсягів рівних цілій степені двійки для систем виконання адаптивно блочно-розмірних перетворень високоякісного стиснення візуальної інформації полягає у визначенні та аналізі складу твірних підмасивів $H_i(n_i)$.

Для узагальнення одержаних результатів складу твірних підмасивів $H_i(n_i)$ може бути використана побудова цілочисельних матричних структур ЦДКП-ІІ коротких обсягів рівних цілій степені двійки, що в результаті визначить розподіл циклічних підматриць в базисній матриці ЦДКП-ІІ.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Сучасною домінуючою технологією багатьох стандартів є використання швидких алгоритмів ЦДКП перетворень візуальної інформації для її стиснення, адже воно вимагає цілочисельних операцій [7]. Для ефективного обчислення ЦДКП-ІІ застосовуються різні форми запису серед них матричне множення з частковою факторизацією (partial butterfly) [8], повною факторизації (full factorization form) [9] та інші.

В роботі [10] проведено аналіз та розглянуто матричні методи побудови швидких ЦДКП для обсягів 8, 16. Шляхом перестановки рядків цілочисельного ядра перетворення на основі обернених досконалих перестановок, а далі двійковими реверсивними перестановками і перестановками по коду Грея обчислення ЦДКП для обсягу 16 приводиться до використання швидких алгоритмів 8-ми і 4-х точкових ЦДКП. Цілочисельна апроксимація ДКП з швидкими алгоритмами низької обчислювальної складності для обсягів 16, 32 описана в роботі [11].

Однак, реалізація даних швидких алгоритмів потребує подальшого розроблення методів синтезу алгоритмів та гнучких структурних схем виконання цілочисельного дискретного косинусного перетворення змінних обсягів рівних цілій степені двійки в системах стиснення візуальної інформації на основі адаптивно блочно-розмірних перетворень.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для зменшення надлишковості даних зображень або відеокадрів широко використовують дискретне косинусне перетворення другого типу виду ДКП-ІІ

$$X_N^{c2}(k) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \alpha(n) x(n) \cos\left[\frac{k(2n+1)\pi}{2N}\right], k = 0,1,\ldots,N-1, \qquad (2)$$

де $x(n)$ – вхідна послідовність перетворення, n=0,1,…,N–1; $\alpha(n)=1/\sqrt{2}$, якщо n=0, інакше $\alpha(n)$=1.

ДКП-ІІ відображає основний енергетичний спектр сигналу в низькочастотній області, що дозволяє при стисненні не враховувати високочастотні складові. В результаті більша частина енергії трансформованих даних концентрується в малому числі коефіцієнтів перетворення.

Цілочисельне дискретне косинусне перетворення (ЦДКП-ІІ) в матричній формі описується через у виді

$$X_N = IC_{N\text{x}N}\ x_N\ d_N, \qquad (3)$$

де $IC_{N\text{x}N}$ – матриця цілочисельного ядра, x_N– вхідна послідовність перетворення, d_N – матриця коефіцієнтів нормування.

В сучасних стандартах відеокодування MPEG-4, AVC/H.264, HEVC/H.265, VC-1 та AVS, застосовують ЦДКП обсягів 4, 8, 16, 32. Розробка ЦДКП повинна відповідати наступним вимогам:

– цілочисельні базисні функції рядків ЦДКП повинні бути максимально наближені по формі до базисних функцій ДКП;

– базисні вектори ядра ЦДКП містять тільки цілі значення и являються ненормованими, тому, крім виконання перетворення, виникає необхідність в процесах масштабування.

© Процько І. О., Кузьмінський Р. Д., Теслюк В. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-16

Наприклад, ЦДКП-II для обсягу $N = 4$ може бути задано набором цілочисельних коефіцієнтів [a=2, b=1, c=1] тому вираз (2) матиме вид

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ 0{,}5B \\ A \\ 0{,}5B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де відповідно умови ортогональності базисних векторів $B = \sqrt{1{,}6\,A^2}$. Стиснення відеоданих на основі блоків з використанням ЦДКП-II є домінуючою технологією багатьох стандартів, адже воно вимагає цілочисельних операцій.

Реалізація швидких алгоритмів в системах стиснення візуальної інформації потребує наявності швидких ЦДКП менших обсягів рівних цілій степені два, що мають конкретні алгоритми свого виконання.

Особливий підхід ефективного обчислення ДКП – це представлення базисної матриці у виді набору циклічних підматриць [6]. Основа методики базується визначенні твірного масиву $H(n)$ для значення обсягу перетворення N. Твірний масив $H(n)$, можна одержати з використанням підстановки за першим та відповідно вибраним непарним рядком цілочисельної матриці аргументів базисної функції ДКП-II.

Розглянемо даний підхід для ЦДКП-II розмірності $N = 8$ [12]. Врахувавши умови ортогональності цілочисельних коефіцієнтів *a,b,c,d,e,f* [13], що формують цілочисельне ядро перетворення, матриця IC_{8x8} може бути подана у виді

$$IC_{8\times8} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ a & b & c & d & -d & -c & -b & -a \\ e & f & -f & -e & -e & -f & f & e \\ b & -d & -a & -c & c & a & d & -b \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ c & -a & d & b & -b & -d & a & -c \\ f & -e & e & -f & -f & e & -e & f \\ d & -c & b & -a & a & -b & c & -d \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Набори цілочисельних елементів повторюються в рядках матриці (5) на основі властивості симетричності базису перетворення, де косинусна функція симетрична відносно аргумента π та асиметрична відносно аргумента π/2. Оптимальні набори цілочисельних коефіцієнти *a, b, c, d, e, f,* що забезпечують високу якість стиснення зображень, підбираються шляхом перебору наборів різних варіантів. Наприклад, для ЦДКП-II для обсягу N=8 ядро може бути задано набором цілочисельних коефіцієнтів (89, 75, 50, 18, 83, 36, 64).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Відповідно розробленої методології [6], для обчислення ЦДКП-II розмірності $N = 8$ застосуємо твірний масив виду

$$H(2N-1) = (\mathbf{1}, \mathbf{3}, 9, \mathbf{5}, 15, 13, \mathbf{7}, 11)\ (\mathbf{2}, \mathbf{6}, 14, 10)(\mathbf{4}, 12)(8). \quad (6)$$

В результаті формування за твірним масивом (6) тримаємо вид структури ядра, що містить набір циклічних підматриць

$$IC_{8\times8} = \begin{bmatrix} a & b & -d & c & -a & -b & d & -c \\ b & -d & c & -a & -b & d & -c & a \\ -d & c & -a & -b & d & -c & a & b \\ c & -a & -b & d & -c & a & b & -d \\ -a & -b & d & -c & a & b & -d & c \\ -b & d & -c & a & b & -d & c & -a \\ d & -c & a & b & -d & c & -a & -b \\ -c & a & b & -d & c & -a & -b & d \\ e & f & -e & -f & e & f & -e & -f \\ f & -e & -f & e & f & -e & -f & e \\ -e & -f & e & f & -e & -f & e & f \\ -f & e & f & -e & -f & e & f & -e \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Тобто, ЦДКП-II обсягу $N = 8$ зводиться до ефективного обчислення 8, 4, 2-точкових циклічних згорток. Ефективне виконання циклічних згорток над послідовностями цілочисельних елементів (*a, b, –d, c, –a,–b, d, –c*) та (*e, f, –e, –f*) та відповідними вхідними значеннями перетворення $x(n)$ визначає вихідні значення X [1], X [3], X [5], X [7], X [2], X [6] перетворення. Вихідні значення X [0], X [4] перетворення, що відповідають верхнім двом рядкам цілочисельного ядра IC_{8x14} перетворення (7) обчислюються через об'єднання вхідних значень $x(n)$ послідовності перетворення.

Відповідно (7), циклічні підматриці містять послідовності з повтореннями набору цілочисельних коефіцієнтів *a, b, –d, c* з протилежним знаком для 8-точкової згортки, та повтореннями набору цілочисельних коефіцієнтів *e, f* з протилежним знаком для 4-точкової згортки. Подвійне повторення послідовності цілочисельних коефіцієнтів в циклічних згортках парних обсягів приводить до зменшення кількості m-множень та a-додавань в швидких алгоритмах циклічних згорток Віноградa з мінімальним числом добутків [14]. Відповідно, в таблиці 1 подано для порівняння кількість операцій m', a' для послідовності циклічної згортки з повторенням групи елементів та кількість операцій m, a для послідовності без повторень, а на рисунку 1 відповідна діаграма кількості операцій множення в швидких алгоритмах циклічних згорток Віноградa з мінімальним числом добутків.

© Процько І. О., Кузьмінський Р. Д., Теслюк В. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-16

Таблиця 1 – Кількість операцій ЦЗ

Обсяг	16	10	8	6	4
m	33	30	12	8	5
m'	12	8	5	4	2
a	181	100	72	34	15
a'	80	67	19	14	6

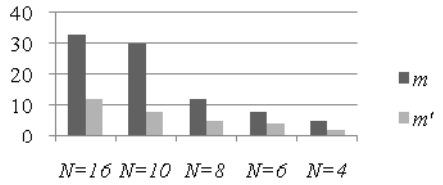


Рисунок 1 – Мінімальна кількість операцій множення m', m для обчислення циклічних згорток з повторенням групи елементів та без повторень

Подвійне повторення послідовності цілочисельних коефіцієнтів однієї з послідовностей згортки приводить до виконання циклічних згорток вдвічі меншого обсягу. Розглянемо алгоритми ЦДКП-ІІ для обсягу перетворень $N = 2^n$ (n=2,3,…,k). Збільшення вдвічі обсягу $2N$ цілочисельного ядра IC перетворення закономірно формується через збільшенням вдвічі розмірності циклічних підматриць. Наприклад, в таблиці 2 обчислення ЦДКП-ІІ обсягу N =16 включає d = 8, 4, 2-точкові циклічні згортки.

Таблиця 2 – Циклічні згортки в структурі базису ЦДКП-ІІ для обсягів $N = 2^n$

N	4	8	16	32	64	128	...	2^n
d	2	4	8	16	32	64		2^{n-1}
	1	2	4	8	16	32		2^{n-2}
		1	2	4	8	16	...	…
			1	2	...	...		2^2
				1	2	2		2
					1	1		1

В загальному випадку для ДКП-ІІ обсягу $N = 2^n$ циклічні підматриці, що визначаються відповідними твірними підмасивами у твірному масиві $H(n)$ в базисній матриці аргументів, задають структуру відповідно таблиці 3. В результаті в табл. 3 відображено, що твірний масив $H(n)$ може складатись з підмасивів з кількістю варіантів а), б), в), … в формі запису (4). Наприклад, твірний масив $H(n)$ варіанту а) для обсягу $N = 2^4 = 16$ містить чотири варіанти твірних масивів і відповідний розподіл циклічних підматриць в базисній матриці ЦДКП, обсяг і значення яких визначаються твірними підмасивами $H_i(n_i)$, В загальному (рис. 2) для варіанту а), матрична структура ЦДКП-ІІ для обсягу N=2^n складається з набору циклічних підматриць, що стисло описується твірним масивом $H(2N–1)$, що містить підмасиви $H_1(2^n)$, $H_2(2^{n-1})$,..., $H_{(n-1)}(2^1)$, $H_n(2^0)$, які і визначають цілочисельні значення сформованих циклічних підматриць.

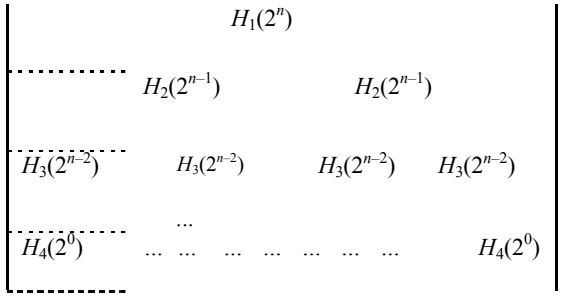


Рисунок 2 – Матрична структура ЦДКП-ІІ варіанту а) для обсягу $N = 2^n$

6 ОБГОВОРЕННЯ

Таким чином, цілочисельне ядро ЦДКП-ІІ можна сформувати у виді набору циклічних підматриць, ефективне обчислення яких приводить до зменшення обчислювальних затрат.

На основі матричної структури (рис. 2) узагальнена структурна схема обчислювача ЦДКП-ІІ включає набір конвольверів, що виконують циклічні згортки обсягів від 2^{n-1},..., 2^3, 2^2 над послідовностями вхідних даних $X[H_i(n_i)]$ та послідовностями цілочисельних косинусних коефіцієнтів $W[H_i(n_i)]$. Виконання повно-

Таблиця 3 – Розподіл підматриць в базисній матриці аргументів ЦДКП-ІІ

а) $H_1(n_1)$ – 2^n-точкових згорток; б) $H_1(n_{11})$, $H_1(n_{12})$ – дві 2^{n-1}-точкових згорток; в) $H_1(n_{111})$, $H_1(n_{112})$, $H_1(n_{121})$ $H_1(n_{122})$ – чотири 2^{n-2}-точкових згорток; …															
а) $H_2(n_2)$ – 2^{n-1}-точкових згорток; б) $H_2(n_{21})$, $H_2(n_{22})$ – дві 2^{n-2}–точкові згортки; …								а) $H_2(n_2)$ б) $H_2(n_{21})$, $H_2(n_{22})$							
а) $H_3(n_3)$ – 2^{n-2} згорток …				$H_3(n_3)$				$H_3(n_3)$				$H_3(n_3)$			
…		…		…		…		…		…		…		…	
$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$	$H(n)$

© Процько І. О., Кузьмінський Р. Д., Теслюк В. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-16

го набору циклічних згорток в конвольверах з подальшим об'єднанням отриманих результатів згорток вимагає при їх апаратній реалізації значних затрат. Реалізація перетворення за узагальненою структурою (рис. 3) характеризується використанням систолічного масиву конвольвера найбільшого розміру для конвольверів менших розмірів при послідовно-паралельному об'єднанні результатів циклічних згорток у вихідному суматорі для визначення вихідних значень перетворення $X[k]$. Малий об'єм необхідної пам'яті, можливість реалізації в арифметиці з обмеженою точністю в ПЕ систолічних масивів (рис. 4) забезпечують при їх реалізації у виді НВІС ефективний показник площа затримка [15, 16].

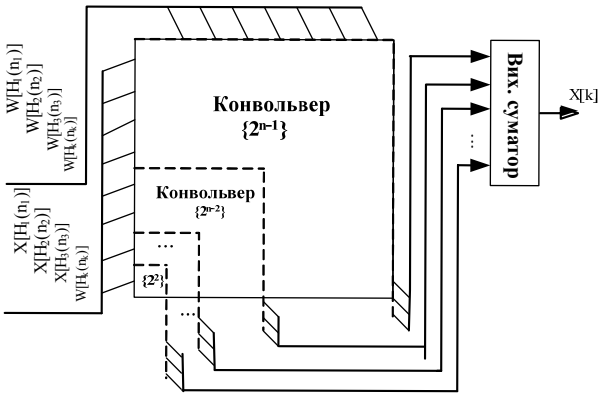


Рисунок 3 – Узагальнена структурна схема обчислювача ЦДКП-II для обсягу $N=2^n$

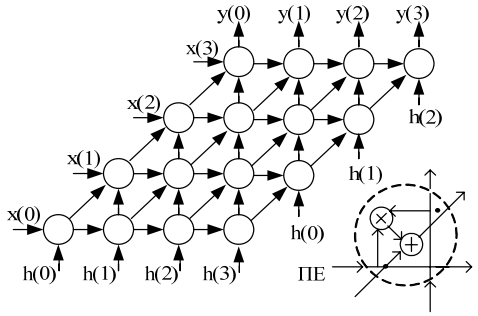


Рисунок 4 – Приклад систолічної структури з шістнадцятьма ПЕ для обчислення 4-х точкової циклічної згортки $y = x * h$

Дана узагальнена структурна схема ЦДКП-II може застосовуватись в системі АБП, що являється ефективним інструментом кодування зображень і відеокомпресії. В стандарті відеокодування H.265 прийнято застосування АБП з обсягами перетворень N = 4, 8, 16, 32. Адже, для областей з найбільшою кореляцією (які, як відомо, найкраще стискаються перетвореннями) використовують перетворення розмірності 32, яке дає найбільше стиснення, а для областей з найменшою кореляцією – перетворення розмірності 4 або 8, які дають найвищу точність. Для знаходження компромісу між ефективністю стиснення і якістю зображення в схемі АБП вибираються блоки розмірності (4 x 4), (4 x 8), (8 x 4), (8 x 8), (8 x 16), (16 x 8), (16 x 16), (16 x 32), (32 x 16), (32 x 32). Використання узагальненої структурної схеми ЦДКП-II з обсягом перетворень $N=2^n$ для ефективного виконання адаптивного двовимірного перетворення текучого кодованого блоку дозволить забезпечити відповідні ступені стиску зображень або відеокадрів сучасних стандартів кодування.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто задачу розподілу циклічних підматриць в базисній матриці ЦДКП-II з обсягом перетворень $N = 2^n$ та, відповідно, побудови загальної структурної схеми обчислювача для адаптивного блочно-розмірного перетворення зображень на основі циклічних згорток.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропоновано загальну структурну схему обчислювача, що виконує обчислення циклічних згорток менших обсягів 2^{n-2}, 2^{n-3},…2^1 на базі конвольвера за обсягом 2^{n-1}.

Практичне значення застосування загальної структурної схеми обчислювача для адаптивного блочно-розмірного перетворення зображень на основі циклічних згорток полягає в ефективному використанні процесорних елементів в систолічних масивах виконання циклічних згорток. При проектуванні НВІС відеокодерів з використанням загальної структурної схеми обчислювача ЦДКП-II досягається високий рівень показника площа/затримка.

Напрям подальших досліджень полягатиме в розробці структурних схем обчислювачів цілочисельних дискретних косинусних перетворень типу I, II на основі циклічних згорток для коротких обсягів цілої степені простого числа.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи ДБ/Енергоефективність «Інтелектуальні інформаційні технології багаторівневого управління енергоефективністю регіону» (номер держ. реєстрації № ДР 0117U004450) (2017–18р.) національного університету «Львівська політехніка» .

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Digital Technologies in Agriculture: adoption, value added and overview [Electronic resource]. – Access mode: https://medium.com/remote-sensing-in-agriculture/digital-technologies-in-agriculture-adoption-value-added-and-overview-d35a1564ff67
2. Jayant N. S. Digital Coding of Waveforms: Principles and Applications to Speech and Video / N. S. Jayant, P. Noll. – Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1984. – 216 p.
3. Video coding standards – AVS China, H.264/MPEG-4 PART 10, HEVC, VP6, DIRAC and VC-1 [Electronic resource]. – Access mode: https://www.springer.com/in/book /9789400767416
4. H.265: High efficiency video coding – ITU 1 [Electronic resource]. – Access mode: https://www.itu.int/rec/T-REC-H.265
5. Reznik Y. A. Design of fast transforms for high-resolution image and video coding / Y. A. Reznik, R. K. Chivukula // Applications of Digital Image Processing – San Diego, California: SPIE 7443 Optical Engineering and Applications, 2009. – P. 1–18. DOI: 10.1117/12.847190
6. Prots'ko I. Algorithm of Efficient Computation of DCT I–IV Using Cyclic Convolutions / I. Prots'ko // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. – 2013. – Vol. 7, Issue 1. – P. 1–9.

© Процько І. О., Кузьмінський Р. Д., Теслюк В. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-16

7. Pei S.-C. The integer transforms analogous to discrete trigonometric transforms / S.-C. Pei, J.-J. Ding // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2000. – Vol. 48, Issue 12. – P. 3345–3364. DOI: 10.1109/78.886998
8. Integer DCTs and fast algorithms / [Y. Zeng, L. Cheng, G. Bi, A. C. Kot] // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2001. – Vol. 49. – P. 2774–2782. DOI: 10.1109/78.960425
9. New fast DCT algorithms based on Loeffler's factorization / [Y. M. Hong, Il-K. Kim, T. Lee et al.] // Samsung Electronics Co., Ltd. (Korea, Republic of) Woo-Jin Han Gachon Univ. (Korea, Republic of) Jeong-Hoon Park Samsung Electronics Co., Ltd. (Korea, Republic of) Applications of Digital Image Processing XXXV. – San Diego, Proceedings Volume 8499, 2012. https://doi.org/10.1117/12.970324
10. Hnativ L. O. Integer cosine transforms for high-efficiency image and video coding / L. O. Hnativ // Cybernetics and Systems Analysis. – 2016. – Vol. 52, No. 5. – P. 802–816. DOI: 10.1007/s10559-016-9881-7
11. Recursive factorization for 16 and 32-point transforms using 4 and 8-point HM 3.0 core transforms / [R. Joshi, Y. Reznik, J. Sole, M. Karczewicz] // MPEG/JCT-VC input document m21026, 97th MPEG meeting. – Torino, 2011. – P. 244–252.
12. Prots'ko I. The efficient computation of integer DCT based on cyclic convolutions / I. Prots'ko, R. Rikmas, V. Teslyuk // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT'2018). – Lviv : Proceeding of the International Scientific and Technical Conference, 2018. – P. 245–248.
13. Siu W.-C. Transform Domain Processing for Recent Signal and Video Applications / W.-C. Siu // Trends in Digital Signal Processing / eds.: Y. C. Lim, H. K. Kwan, W.-C. Siu. – Taylor & Francis Group, LLC. 2016. – P. 201–261.
14. Blahut R. E. Fast algorithms for signal processing / R. E. Blahut. – Cambridge : University Press, 2010. – 469 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511760921.001
15. Cheng C. Hardware Efficient Fast DCT Based on Novel Cyclic Convolution Structures / C. Cheng, K. K. Parhi // IEEE Transactions on signal processing. – 2006. – Vol. 54, No. 11. – P. 4419–4434. DOI: 10.1109/TSP.2006.881269
16. Meher P. K. Systolic designs for DCT using a low-complexity concurrent convolutional formulation / P. K. Meher // IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology. – 2006. – Vol. 16, No. 9. – P. 1041–1050. DOI: 10.1109/TCSVT.2006.880191

Стаття надійшла до редакції 13.12.2018.
Після доробки 11.02.2018.

УДК 681.391, 621.372

ЭФФЕКТИВНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ДКП-II ДЛЯ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Процько И. Е. – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных систем и технологий Национального университета «Львивська политэхника», Львов, Украина.

Кузьминський Р. Д. – д-р техн. наук, професор, заведующий кафедрой эксплуатации и технического сервиса машин Львовского национального аграрного университета, Дубляны, Украина.

Теслюк В. М. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и технологий Национального университета «Львивська политэхника», Львов, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Обеспечение результативности и многофункциональности современных средств обработки визуальной информации требует разработки различных методов эффективного выполнения дискретного косинусного преобразования. В соответствии с требованиями современных видеостандартов, обеспечение высокой четкости сжатой визуальной информации достигается на основе адаптивно блочно-размерных преобразований, что требует эффективных вычислительных схем выполнения дискретного косинусного преобразований переменных размерностей.

Цель работы – создание обобщенной структурной схемы эффективного вычисления целочисленного дискретного косинусного преобразования на основе циклических сверток размерностей равных целой степени двойки, что обеспечивает низкую вычислительную сложность и возможность применения в системах сжатия визуальной информации на основе адаптивно блочно-размерных преобразований.

Метод. Предложено использование образующих массивов для эффективного синтеза алгоритмов и структурных схем вычисления целочисленного дискретного косинусного преобразования на основе циклических сверток.

Результаты. Итогом исследования является разработка обобщенной структурной схемы вычисления целочисленного дискретного косинусного преобразования для размерностей равных целой степени двойки в системах сжатия визуальной информации на основе адаптивно блочно-размерных преобразований.

Выводы. В проведенном исследовании применен подход приведения базиса целочисленного дискретного косинусного преобразования к набору левоциклических подматриц, что позволяет вычислять преобразования на основе циклических сверток. Основная идея применения надлежащего математического аппарата заключается в использовании образующих массивов, содержащих краткое описание блочно-циклической структуры базиса преобразования. На основании полученного набора циклических подматриц ядра преобразования разработана обобщенная структурная схема эффективного выполнения целочисленного дискретного косинусного преобразования малых размерностей равных целой степени двойки. Вычисления соответствующего набора циклических сверток и объединения их результатов по структурной схеме обеспечивает выполнение адаптивно блочно-размерных преобразований для систем сжатия визуальной информации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: целочисленное дискретное косинусное преобразование, циклическая свертка, образующий массив, сжатие изображений, адаптивное блочно-размерное преобразование.

UDC 681.391, 621.372

EFFICIENT COMPUTATION OF THE INTEGER DCT-II FOR COMPRESSING IMAGES

Prots'ko I. O. – PhD., Associate Professor of Information Systems and Technologies Department, Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine

Kuzminskij R. D. – Dr.Sc, Professor, Head of Operation and Technical Service of the Mashines Department, Lviv National Agricultural University, Dubliany, Ukraine

© Процько І. О., Кузьмінський Р. Д., Теслюк В. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-16

Teslyuk V. M. – Dr.Sc, Professor, Head of Information Systems and Technologies Department, Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine

ABSTRACT

Actuality. Ensuring the efficiency and versatility of modern media for processing visual information requires the development of various methods for the effective implementation of the discrete cosine transform. In accordance with the requirements of modern video standards, providing high-definition compressed visual information is achieved on the basis of adaptively block-dimensional transforms, which requires efficient computational schemes for the implementation of discrete cosine transform of variable dimensions.

The purpose of the work is to create a generalized structural scheme for the efficient computation of an integer discrete cosine transform on the basis of cyclic convolutions of dimensions equal to the integer power of two, which provides low computational complexity and the possibility of using visual information compression systems on the basis of adaptively block-dimensional transforms.

Method. The use of hashing arrays for efficient synthesis of algorithms and structure schemes for computing an integer discrete cosine transform on the basis of cyclic convolutions is proposed.

Results. The result of the study is the development of a generalized structural scheme for the implementation of an integer discrete cosine transform of dimensions equal to the integer power of the two for the compression of visual information on the basis of adaptively block-dimensional transforms.

Conclusions. In the study, we apply the approach of bringing the basis of an integral discrete cosine transform to a set of left cyclic submatrices, which allows us to calculate transforms based on cyclic convolutions. The basic idea of using an appropriate mathematical apparatus is to use hashing arrays containing a brief description of the block-cyclic structure of the transform basis. On the basis of the received set of cyclic submatrices of the transform core, a generalized structural scheme for the effective implementation of an integer discrete cosine transform of small dimensions equal to an integer power of the two is developed. The computation of the corresponding set of cyclic convolutions and the combining of their results by the structural scheme ensures the implementation of adaptively block-dimensional transforms for compression of visual information.

KEYWORDS: integer discrete cosine transformation, cyclic convolution, hashing array, image compression, adaptive block-dimensional transform.

REFERENCES

1. Digital Technologies in Agriculture: adoption, value added and overview [Electronic resource]. Access mode: https://medium.com/remote-sensing-in-agriculture/digital-technologi es-in-agriculture-adoption-value-added-and-overview-d35a 1564ff67
2. Jayant N. S., Noll P. Digital Coding of Waveforms: Principles and Applications to Speech and Video. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984, 216 p.
3. Video coding standards, AVS China, H.264/MPEG-4 PART 10, HEVC, VP6, DIRAC and VC-1 [Electronic resource]. Access mode: https://www.springer.com/in/book/9789400767416
4. H.265: High efficiency video coding. ITU 1 [Electronic resource]. Access mode: https://www.itu.int/rec/T-REC-H.265
5. Reznik Y. A., Chivukula R. K. Design of fast transforms for high-resolution image and video coding, *Applications of Digital Image Processing*. San Diego, California, SPIE 7443 Optical Engineering and Applications, 2009, pp. 1–18. DOI: 10.1117/12.847190
6. Prots'ko I. Algorithm of Efficient Computation of DCT I–IV Using Cyclic Convolutions, *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing,* 2013, Vol. 7, Issue 1, pp. 1–9.
7. Pei S.-C., Ding J.-J. The integer transforms analogous to discrete trigonometric transforms / S.-C. Pei, *// IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, Vol. 48, Issue 12, pp. 3345–3364. DOI: 10.1109/78.886998
8. Zeng Y., Cheng L., Bi G., Kot A. C. Integer DCTs and fast algorithms, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, Vol. 49, pp. 2774–2782. DOI: 10.1109/78.960425
9. [Hong Y.M., Kim Il-K., Lee T., Cheon M.-S., Alshina E., Han W.-J., Park J.-H. New fast DCT algorithms based on Loeffler's factorization, *Applications of Digital Image Processing XXXV*. San Diego, Proceedings Volume 8499, 2012. https://doi.org/10.1117/12.970324
10. Hnativ L.O. Integer cosine transforms for high-efficiency image and video coding, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, Vol. 52, No. 5, pp. 802–816. DOI: 10.1007/s10559-016-9881-7
11. Joshi R., Reznik Y., Sole J., Karczewicz M. Recursive factorization for 16 and 32-point transforms using 4 and 8-point HM 3.0 core transforms, *MPEG/JCT-VC input document m21026, 97th MPEG meeting.* Torino, 2011, pp. 244–252.
12. Prots'ko I., Rikmas R., Teslyuk V. The efficient computation of integer DCT based on cyclic convolutions, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT'2018).* Lviv, Proceeding of the International Scientific and Technical Conference, 2018, pp. 245–248.
13. Siu W.-C. eds.: Lim Y. C., Kwan H. K., Siu W.-C. Transform Domain Processing for Recent Signal and Video Applications, *Trends in Digital Signal Processing*. Taylor & Francis Group, LLC, 2016, pp. 201–261.
14. Blahut R. E. Fast algorithms for signal processing. Cambridge, University Press, 2010, 469 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511760921.001
15. Cheng C., Parhi K. K. Hardware Efficient Fast DCT Based on Novel Cyclic Convolution Structures, *IEEE Transactions on signal processing*, 2006, Vol. 54, No. 11, pp. 4419–4434. DOI: 10.1109/TSP.2006.881269
16. Meher P. K. Systolic designs for DCT using a low-complexity concurrent convolutional formulation, *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, 2006, Vol. 16, No. 9, pp. 1041–1050. DOI: 10.1109/TCSVT.2006.880191

© Процько І. О., Кузьмінський Р. Д., Теслюк В. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-16

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

UDC 004.412:519.237.5

A MULTIPLE NON-LINEAR REGRESSION MODEL TO ESTIMATE THE AGILE TESTING EFFORTS FOR SMALL WEB PROJECTS

Prykhodko N. V. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Finance Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

Prykhodko S. B. – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Software of Automated Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Software testing effort estimation is one of the important problems in software development and software testing life cycle. The object of the study is the process of estimating the agile testing efforts for small Web projects. The subject of the study is the multiple regression models for estimating the agile testing efforts for small Web projects.

Objective. The goal of the work is the creation of the multiple non-linear regression model for estimating the agile testing efforts for small Web projects on the basis of the Johnson multivariate normalizing transformation.

Method. The model, confidence and prediction intervals of multiple non-linear regression for estimating the agile testing efforts for small Web projects are constructed on the basis of the Johnson multivariate normalizing transformation for non-Gaussian data with the help of appropriate techniques. The techniques based on the multiple non-linear regression analysis using the multivariate normalizing transformations to build the models, equations, confidence and prediction intervals of multiple non-linear regressions are used. The techniques allow to take into account the correlation between random variables in the case of normalization of multivariate non-Gaussian data. In general, this leads to a reduction of the mean magnitude of relative error, the widths of the confidence and prediction intervals in comparison with the linear models and nonlinear models constructed using univariate normalizing transformations.

Results. Comparison of the constructed model with the linear model and non-linear regression models based on the decimal logarithm and the Johnson univariate transformation has been performed.

Conclusions. The multiple non-linear regression model to estimate the agile testing efforts for small Web projects is firstly constructed on the basis of the Johnson multivariate transformation for S_B family. This model, in comparison with other regression models (both linear and non-linear), has a smaller value of the mean magnitude of relative error, smaller widths of the confidence and prediction intervals. The prospects for further research may include the application of other multivariate normalizing transformations and data sets to construct the multiple non-linear regression model for estimating the agile testing efforts for small Web projects.

KEYWORDS: agile testing, estimation, testing effort, Web project, multiple non-linear regression model, multivariate normalizing transformation, non-Gaussian data.

ABBREVIATIONS

LB is lower bound;
MD is Mahalanobis distance;
MRE is a magnitude of relative error;
MMRE is a mean magnitude of relative error;
PRED is percentage of prediction;
UB is upper bound.

NOMENCLATURE

$\hat{\mathbf{b}}$ is estimator for vector of linear regression equation parameters, $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, \ldots, b_k\}^T$;

$\hat{b}_i$ is estimator for the *i*-th parameter of linear regression equation;

k is a number of independent variables (regressors);

N is a number of data points;

$N(0,1)$ is a Gaussian distribution with zero mathematical expectation and unit variance;

$\mathbf{P}$ is a non-Gaussian random vector, $\mathbf{P} = \{Y, X_1, X_2, \ldots, X_k\}^T$;

R^2 is a multiple coefficient of determination;

$\mathbf{S}_N$ is a sample covariance matrix, $\mathbf{S}_N = \left[S_{ij}\right]$;

$\mathbf{T}$ is a Gaussian random vector, $\mathbf{T} = \{Z_Y, Z_1, Z_2, \ldots, Z_k\}^T$;

$t_{\alpha/2,\nu}$ is a quantile of student's *t*-distribution with ν degrees of freedom and $\alpha/2$ significance level;

X_1 is a number of test cases;

X_2 is a number of design document pages;

X_3 is a number of defects;

Y is an actual testing effort in person hours;

$\mathbf{Z}_X^+$ is a matrix of centered regressors that contains the values $Z_{1_i} - \overline{Z}_1$, $Z_{2_i} - \overline{Z}_2$, …, $Z_{k_i} - \overline{Z}_k$;

$\left(\mathbf{Z}_X^+\right)^T$ is a transpose of $\mathbf{Z}_X^+$;

$\mathbf{z}_X^+$ is a vector with components $Z_{1_i} - \overline{Z}_1$, $Z_{2_i} - \overline{Z}_2$, …, $Z_{k_i} - \overline{Z}_k$ for *i*-row;

$\left(\mathbf{z}_X^+\right)^T$ is a transpose of $\mathbf{z}_X^+$;

$\overline{Z}_Y$ is a sample mean of the values of the variable Z_Y;

$\hat{Z}_Y$ is a prediction linear regression equation result;

α is a significance level;

© Prykhodko N. V., Prykhodko S. B., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-17

β_1 is a multivariate skewness;

β_2 is a multivariate kurtosis;

$\boldsymbol{\gamma}$ is a vector of parameters of the Johnson multivariate translation, $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_Y, \gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_k)^T$;

ε is a Gaussian random variable which defines residuals, $\varepsilon \sim N(0,1)$;

$\boldsymbol{\eta}$ is a vector of parameters of the Johnson multivariate translation, $\boldsymbol{\eta} = \mathrm{diag}(\eta_Y, \eta_1, \ldots, \eta_k)$;

$\boldsymbol{\lambda}$ is a vector of parameters of the Johnson multivariate translation, $\boldsymbol{\lambda} = \mathrm{diag}(\lambda_Y, \lambda_1, \ldots, \lambda_k)$;

ν is a number of degrees of freedom;

$\boldsymbol{\Sigma}$ is a covariance matrix, $\boldsymbol{\Sigma} = [\Sigma_{ij}]$;

φ is a vector of parameters of the Johnson multivariate translation, $\varphi = (\varphi_Y, \varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_k)^T$;

$\boldsymbol{\psi}$ is a vector of multivariate normalizing transformation, $\boldsymbol{\psi} = \{\psi_Y, \psi_1, \psi_2, \ldots, \psi_k\}^T$.

INTRODUCTION

Software testing effort estimation is one of the important problems in software development and software testing life cycle. Agile testing is a software testing process that follows the principles of agile software development [1–5]. In comparison with waterfall testing, it is a new age software testing approach which leads to a reduction of testing efforts. Agile testing is well suited for small software projects including small Web projects.

The agile testing lifecycle consists of the 5 phases [5], the second of which is agile testing planning, that includes testing effort estimation. A testing effort estimation is a difficult problem, for the solution of which various mathematical models are applied.

Today one of the most well-known effort estimation model is the COCOMO II (COnstructive COst MOdel) [6]. The COCOMO II is a non-linear regression equation with parameters that are derived from historical data of software projects. This equation is built on the basis of univariate normalizing transformation in the decimal logarithm form. The paper [7] proposed the multiple linear and non-linear regression equations for estimating the testing efforts of software projects including large ones. However, a prediction regression equation result is a mean value of dependent random variable. There is no random error term in regression equation. A prediction regression model result is a value of dependent random variable, since there is the random error term in regression model. Therefore, to predict agile testing effort as a value of a dependent random variable there is the need to develop the appropriate non-linear regression models.

The object of study is the process of estimating the agile testing efforts for small Web projects.

The subject of study is the multiple non-linear regression models to estimate the agile testing efforts for small Web projects.

The purpose of the work is to construct the multiple non-linear regression model for estimating the agile testing efforts for small Web projects. The agile testing effort prediction results by constructed model should be better in comparison with other regression models, both linear and nonlinear, primarily on such standard evaluations as mean magnitude of relative error, widths of confidence and prediction intervals.

1 PROBLEM STATEMENT

Suppose given the original sample as the four-dimensional non-Gaussian data set: actual testing effort in person hours Y, the total number of test cases X_1, the total number of design document pages X_2 and the number of defects X_3 from N small Web projects. Suppose that there are bijective multivariate normalizing transformation of non-Gaussian random vector $\mathbf{P} = \{Y, X_1, X_2, \ldots, X_k\}^T$ to Gaussian random vector $\mathbf{T} = \{Z_Y, Z_1, Z_2, \ldots, Z_k\}^T$ is given by

$$\mathbf{T} = \boldsymbol{\psi}(\mathbf{P}) \tag{1}$$

and the inverse transformation for (1)

$$\mathbf{P} = \boldsymbol{\psi}^{-1}(\mathbf{T}). \tag{2}$$

It is required to build the multiple non-linear regression model in the form $Y = Y(X_1, X_2, X_3, \varepsilon)$ on the basis of the transformations (1) and (2).

2 REVIEW OF THE LITERATURE

A normalizing transformation is often a good way to build the models, equations, confidence and prediction intervals of multiple non-linear regressions [8–13]. According to [9] transformations are made for essentially four purposes, two of which are: firstly, to obtain approximate normality for the distribution of the error term (residuals) or the dependent random variable, secondly, to transform the response and/or the predictor in such a way that the strength of the linear relationship between new variables (normalized variables) is better than the linear relationship between dependent and independent random variables.

Well-known techniques for building the models, equations, confidence and prediction intervals of multiple non-linear regressions are based on the univariate normalizing transformations (such as, the decimal logarithm, the natural logarithm, the Box-Cox transformation), which do not take into account the correlation between random variables in the case of normalization of multivariate non-Gaussian data. Application of univariate normalizing transformations for building the multiple non-linear regression models does not always lead to good prediction results by such regression models, primarily on such standard evaluations as mean magnitude of relative error, widths of confidence and prediction intervals [13]. This leads to the need to use the multivariate normalizing transformations.

© Prykhodko N. V., Prykhodko S. B., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-17

In [13] the techniques to build the models, confidence and prediction intervals of multiple non-linear regressions for multivariate non-Gaussian data on the basis of the bijective multivariate normalizing transformations were proposed. The techniques consist of three steps. In the first step, a set of multivariate non-Gaussian data is normalized using a bijective multivariate normalizing transformation. In the second step, the model, confidence and prediction intervals of linear regression for the normalized data are built. In the third step, the model, confidence and prediction intervals of multiple non-linear regression for multivariate non-Gaussian data are constructed on the basis of the model, confidence and prediction intervals of linear regression for the normalized data and the multivariate normalizing transformation.

Non-linear regression prediction results by models, which constructed in the papers [13, 14] on the basis of the Johnson multivariate normalizing transformation, are better in comparison with other regression models, both linear and nonlinear, primarily on such standard evaluations as mean magnitude of relative error, widths of confidence and prediction intervals.

This leads to the need to develop the multiple non-linear regression model for estimating the agile testing efforts for small Web projects on the basis of the multivariate normalizing transformations.

3 MATERIALS AND METHODS

After normalizing the non-Gaussian data by the transformation (1) the linear regression model is built for normalized data. The linear regression model for normalized data will have the form [13]

$$Z_Y = \hat{Z}_Y + \varepsilon = \overline{Z}_Y + \left(\mathbf{Z}_X^+\right)\hat{\mathbf{b}} + \varepsilon . \qquad (3)$$

After that the multiple non-linear regression model is built on the basis of the linear regression model (3) for the normalized data and the transformations (1) and (2). The non-linear regression model will have the form [13]

$$Y = \psi_Y^{-1}\left[\overline{Z}_Y + \left(\mathbf{Z}_X^+\right)\hat{\mathbf{b}} + \varepsilon\right] . \qquad (4)$$

The technique to build a confidence interval of multiple non-linear regression is based on a confidence interval of linear regression for normalized data, and transformations (1) and (2) [13]:

$$\psi_Y^{-1}\left(\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2,\nu} S_{Z_Y} \left\{ \frac{1}{N} + \left(\mathbf{z}_X^+\right)^T \left[\left(\mathbf{Z}_X^+\right)^T \mathbf{Z}_X^+ \right]^{-1} \left(\mathbf{z}_X^+\right) \right\}^{1/2} \right) ,$$

where $S_{Z_Y}^2 = \frac{1}{\nu}\sum_{i=1}^{N}\left(Z_{Y_i} - \hat{Z}_{Y_i}\right)^2$, $\nu = N - k - 1$; $\left(\mathbf{Z}_X^+\right)^T \mathbf{Z}_X^+$ is the $k \times k$ matrix

$$\left(\mathbf{Z}_X^+\right)^T \mathbf{Z}_X^+ = \begin{pmatrix} S_{Z_1Z_1} & S_{Z_1Z_2} & \dots & S_{Z_1Z_k} \\ S_{Z_1Z_2} & S_{Z_2Z_2} & \dots & S_{Z_2Z_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{Z_1Z_k} & S_{Z_2Z_k} & \dots & S_{Z_kZ_k} \end{pmatrix},$$

where $S_{Z_qZ_r} = \sum_{i=1}^{N}\left[Z_{q_i} - \overline{Z}_q\right]\left[Z_{r_i} - \overline{Z}_r\right]$, $q, r = 1,2,\dots,k$.

The technique to build a prediction interval of multiple non-linear regression is based on a prediction interval of linear regression for normalized data, and transformations (1) and (2) [13]:

$$\psi_Y^{-1}\left(\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2,\nu} S_{Z_Y} \left\{ 1 + \frac{1}{N} + \left(\mathbf{z}_X^+\right)^T \left[\left(\mathbf{Z}_X^+\right)^T \mathbf{Z}_X^+ \right]^{-1} \left(\mathbf{z}_X^+\right) \right\}^{1/2} \right) .$$

For normalizing the multivariate non-Gaussian data, we use the Johnson translation system. In our case the Johnson normalizing translation is given by [14]

$$\mathbf{T} = \boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\eta}\mathbf{h}\left[\boldsymbol{\lambda}^{-1}\left(\mathbf{P} - \varphi\right)\right] \sim N_m\left(\mathbf{0}_m, \boldsymbol{\Sigma}\right), \qquad (5)$$

where $\mathbf{h}\left[\left(y_Y, y_1, \dots, y_k\right)\right] = \left\{h_Y\left(y_Y\right), h_1\left(y_1\right), \dots, h_k\left(y_k\right)\right\}^T$; $h_i(\cdot)$ is one of the translation functions

$$h = \begin{cases} \ln(y), & \text{for } S_L \text{ (log normal) family;} \\ \ln\left[y/(1-y)\right], & \text{for } S_B \text{ (bounded) family;} \\ \operatorname{Arsh}(y), & \text{for } S_U \text{ (unbounded) family;} \\ y & \text{for } S_N \text{ (normal) family.} \end{cases} \qquad (6)$$

Here $y = (X - \varphi)/\lambda$; $\operatorname{Arsh}(y) = \ln\left(y + \sqrt{y^2 + 1}\right)$. In our case X equals Y, X_1, X_2 or X_3 respectively.

The model, equation, confidence and prediction intervals of multiple non-linear regression to estimate agile testing efforts for small Web projects are constructed on the basis of the Johnson multivariate normalizing transformation for the four-dimensional non-Gaussian data set from Table 1 for 40 small Web projects (rows 1–40). Also Table 1 contains the values of squared Mahalanobis distance (MD) for 41 and 40 (after outlier cutoff) data rows. For detecting the outliers in the data from Table 1 we use the technique based on multivariate normalizing transformations and the squared MD [15]. There is one outlier in the data from Table 1 for 0.005 significance level and the Johnson multivariate transformation (5) for S_B family.

Parameters of the multivariate transformation (5) for S_B family were estimated by the maximum likelihood method. Estimators for parameters of the transformation (6) for 41 data rows are: $\hat{\gamma}_Y = 4.09443$, $\hat{\gamma}_1 = 5.47043$, $\hat{\gamma}_2 = 1.09282$, $\hat{\gamma}_3 = 1.37671$, $\hat{\eta}_Y = 1.04794$, $\hat{\eta}_1 = 0.97350$, $\hat{\eta}_2 = 0.70189$, $\hat{\eta}_3 = 0.64464$, $\hat{\varphi}_Y = 0.37266$, $\hat{\varphi}_1 = 1.95622$, $\hat{\varphi}_2 = 0.94564$, $\hat{\varphi}_3 = 2.35215$, $\hat{\lambda}_Y = 327.313$, $\hat{\lambda}_1 = 5438.99$, $\hat{\lambda}_2 = 130.495$ and $\hat{\lambda}_3 = 110.210$. The sample covariance

© Prykhodko N. V., Prykhodko S. B., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-17

matrix $\mathbf{S}_N$ of the $\mathbf{T}$ is used as the approximate moment-matching estimator of $\mathbf{\Sigma}$

$$\mathbf{S}_N = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.9812 & 0.4088 & 0.8497 \\ 0.9812 & 1.0000 & 0.4326 & 0.7519 \\ 0.4088 & 0.4326 & 1.0000 & 0.2029 \\ 0.8497 & 0.7519 & 0.2029 & 1.0000 \end{pmatrix}.$$

The data of system 41 is multivariate outlier, since for this data row the squared MD equals to 20.43 is greater than the value of the quantile of the Chi-Square distribution, which equals to 14.86 for 0.005 significance level. The same result was obtained for the univariate transformation in the decimal logarithm form. In this case the data of system 41 is multivariate outlier too, since for this data row the squared MD equals to 20.26.

The squared MD values for 40 data rows indicate there are no outliers in this data from Table 1.

Table 1 – The data set and squared MDs

No	Y	X_1	X_2	X_3	Squared MD	
					N=41	N=40
1	1.33	4	11	4	5.69	6.14
2	3.51	11	2	7	5.75	5.83
3	3.17	10	4	8	2.67	2.50
4	1.53	5	14	4	3.80	4.38
5	2.35	9	12	3	4.71	5.56
6	3.13	10	8	9	2.56	2.39
7	2.03	6	16	7	3.92	4.07
8	3.22	11	11	6	1.31	1.34
9	2.73	10	16	5	2.83	3.89
10	4.65	16	13	7	0.75	0.68
11	5.52	21	12	4	7.56	7.32
12	2.75	7	23	12	4.28	6.42
13	6.93	25	6	13	2.68	2.83
14	3.73	14	29	4	2.44	2.47
15	5.08	18	22	7	0.62	0.60
16	7.12	25	11	11	1.11	1.06
17	3.24	10	31	9	2.49	2.19
18	4.05	12	35	6	2.63	4.16
19	4.72	16	32	7	0.58	0.51
20	3.49	13	41	4	2.52	2.58
21	6.03	18	24	18	0.64	0.57
22	4.13	12	40	13	2.35	2.20
23	10.18	33	15	23	0.62	0.64
24	9.95	36	29	12	1.21	1.10
25	8.67	24	36	32	1.37	1.92
26	16.53	51	3	45	7.11	7.40
27	12.45	44	37	18	0.97	0.91
28	15.56	56	25	19	2.84	2.64
29	17.47	57	7	40	3.92	3.98
30	11.23	29	48	47	2.78	4.27
31	8.21	29	79	10	2.30	2.17
32	19.95	50	6	90	8.33	9.59
33	16.16	44	53	61	3.12	3.88
34	8.83	33	110	8	6.14	5.95
35	12.97	47	94	16	3.30	3.13
36	21.32	94	48	37	4.73	7.40
37	20.97	83	61	62	8.87	11.09
38	38.22	127	25	78	4.77	4.83
39	26.48	111	71	54	5.50	7.38
40	48.2	173	120	60	11.73	12.03
41	7.07	11	13	51	**20.43**	–

Estimators for parameters of the transformation (5) for S_B family for 40 data rows are: $\hat{\gamma}_Y = 3.8484$, $\hat{\gamma}_1 = 5.4050$, $\hat{\gamma}_2 = 1.0397$, $\hat{\gamma}_3 = 1.3214$, $\hat{\eta}_Y = 0.9990$, $\hat{\eta}_1 = 0.96416$, $\hat{\eta}_2 = 0.68334$, $\hat{\eta}_3 = 0.61537$, $\hat{\varphi}_Y = 0.52944$, $\hat{\varphi}_1 = 2.0172$, $\hat{\varphi}_2 = 1.0107$, $\hat{\varphi}_3 = 2.5590$, $\hat{\lambda}_Y = 298.41$, $\hat{\lambda}_1 = 5439.41$, $\hat{\lambda}_2 = 128.66$ and $\hat{\lambda}_3 = 103.668$. The sample covariance matrix $\mathbf{S}_N$

$$\mathbf{S}_N = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.9898 & 0.4108 & 0.8588 \\ 0.9898 & 1.0000 & 0.4280 & 0.7909 \\ 0.4108 & 0.4280 & 1.0000 & 0.2204 \\ 0.8588 & 0.7909 & 0.2204 & 1.0000 \end{pmatrix}.$$

After normalizing the non-Gaussian data by the multivariate transformation (5) for S_B family the linear regression model is built for normalized data

$$Z_Y = \hat{Z}_Y + \varepsilon = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 Z_1 + \hat{b}_2 Z_2 + \hat{b}_3 Z_3 + \varepsilon. \qquad (7)$$

Parameters of the linear regression model (7) were estimated by the least square method. Estimators for parameters of the model (7) are such: $\hat{b}_0 = 0$, $\hat{b}_1 = 0.81961$, $\hat{b}_2 = 0.01428$, $\hat{b}_3 = 0.20730$.

After that the multiple non-linear regression model (4) is built

$$Y = \hat{\varphi}_Y + \hat{\lambda}_Y \left[1 + e^{-\left(\hat{Z}_Y + \varepsilon - \hat{\gamma}_Y\right)/\hat{\eta}_Y} \right]^{-1}, \qquad (8)$$

where $Z_j = \gamma_j + \eta_j \ln \dfrac{X_j - \varphi_j}{\varphi_j + \lambda_j - X_j}$, $\varphi_j < X_j < \varphi_j + \lambda_j$, $j = 1,2,3$.

The model (8) is the multiple non-linear regression model to estimate the agile testing efforts for small Web projects.

4 EXPERIMENTS

For comparison of the model (8) with other multiple models one linear regression model and two non-linear regression models are built on the basis of 40 data rows from Table 1 and two univariate normalizing transformations: the decimal logarithm transformation and the Johnson transformation.

The multiple linear regression model has the form

$$Y = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 X_1 + \hat{b}_2 X_2 + \hat{b}_3 X_3 + \varepsilon, \qquad (9)$$

where the estimators for parameters are: $\hat{b}_0 = 0.26513$, $\hat{b}_1 = 0.23116$, $\hat{b}_2 = -0.00082$, $\hat{b}_3 = 0.08374$.

The multiple non-linear regression model is constructed on the basis of the linear regression model (7)

© Prykhodko N. V., Prykhodko S. B., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-17

for the normalized data and the decimal logarithm transformation

$$Y = 10^{\varepsilon+\hat{b}_0} X_1^{\hat{b}_1} X_2^{\hat{b}_2} X_3^{\hat{b}_3}, \qquad (10)$$

where the estimators for parameters are: $\hat{b}_0 = -0.4500$, $\hat{b}_1 = 0.78887$, $\hat{b}_2 = 0.00176$, $\hat{b}_3 = 0.18782$.

The multiple non-linear regression model is constructed on the basis of the linear regression model (7) for the normalized data and the Johnson univariate transformation for S_B family (6). In this case the estimators for parameters of the model (8) are: $\hat{\gamma}_Y = 1.72684$, $\hat{\gamma}_1 = 1.78876$, $\hat{\gamma}_2 = 1.2346$, $\hat{\gamma}_3 = 1.1127$, $\hat{\eta}_Y = 0.73211$, $\hat{\eta}_1 = 0{,}73090$, $\hat{\eta}_2 = 0.72269$, $\hat{\eta}_3 = 0.53444$, $\hat{\varphi}_Y = 1.1292$, $\hat{\varphi}_1 = 3{,}3512$, $\hat{\varphi}_2 = 1.1717$, $\hat{\varphi}_3 = 2.90$, $\hat{\lambda}_Y = 64.039$, $\hat{\lambda}_1 = 237.48$, $\hat{\lambda}_2 = 142.95$, $\hat{\lambda}_3 = 92.745$, $\hat{b}_0 = 0$, $\hat{b}_1 = 0.86376$, $\hat{b}_2 = 0.00240$ and $\hat{b}_3 = 0.16633$.

The computer program implementing the constructed models (8), (9) and (10) was developed to conduct experiments. The program was written in the sci-language for the Scilab system. Scilab (http://www.scilab.org) is the free and open source software, the alternative to commercial packages for system modeling and simulation packages such as MATLAB and MATRIXx.

5 RESULTS

If the Gaussian random variable ε equals zero the regression models (8), (9) and (10) are the multiple regression equations for which the prediction results for values of components of vector $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}$ from Table 1 and values of MRE are shown in the Table 2.

Table 2 – The prediction results and confidence intervals of multiple regressions

No	Multiple linear regression				Multiple non-linear regressions											
					univariate normalizing transformation								the Johnson multivariate normalizing transformation			
					the decimal logarithm				the Johnson transformation							
	$\hat{Y}$	MRE	LB	UB	$\hat{Y}$	MRE	LB	UB	$\hat{Y}$	MRE	LB	UB	$\hat{Y}$	MRE	LB	UB
1	1.516	0,1396	0.934	2.097	1.380	0.0375	1.312	1.451	1.360	0.0225	1.334	1.389	1.298	0.0242	1.252	1.346
2	3.392	0,0335	2.752	4.033	3.394	0.0329	3.192	3.609	3.383	0.0363	3.154	3.636	3.387	0.0352	3.223	3.560
3	3.243	0,0231	2.635	3.851	3.233	0.0197	3.088	3.384	3.188	0.0055	3.042	3.344	3.234	0.0203	3.121	3.352
4	1.744	0,1401	1.179	2.310	1.646	0.0760	1.574	1.722	1.645	0.0751	1.603	1.691	1.593	0.0411	1.541	1.648
5	2.587	0,1008	2.000	3.174	2.479	0.0549	2.371	2.592	2.248	0.0436	2.114	2.399	2.312	0.0160	2.210	2.421
6	3.324	0,0619	2.758	3.890	3.309	0.0571	3.192	3.430	3.239	0.0347	3.121	3.363	3.320	0.0607	3.222	3.421
7	2.225	0,0961	1.685	2.765	2.112	0.0404	2.016	2.213	2.041	0.0056	1.969	2.120	2.079	0.0240	2.001	2.161
8	3.301	0,0252	2.735	3.868	3.308	0.0272	3.204	3.415	3.320	0.0310	3.210	3.435	3.357	0.0425	3.270	3.447
9	2.982	0,0924	2.438	3.527	2.967	0.0867	2.871	3.065	2.983	0.0928	2.888	3.085	3.005	0.1006	2.925	3.087
10	4.539	0,0238	3.982	5.096	4.577	0.0157	4.439	4.720	4.624	0.0055	4.462	4.794	4.673	0.0049	4.551	4.799
11	5.445	0,0137	4.797	6.092	5.105	0.0751	4.822	5.406	5.127	0.0712	4.790	5.493	5.075	0.0806	4.816	5.350
12	2.869	0,0434	2.331	3.408	2.641	0.0397	2.495	2.795	2.461	0.1053	2.347	2.584	2.585	0.0598	2.470	2.708
13	7.128	0,0285	6.509	7.746	7.301	0.0535	7.001	7.614	7.304	0.0540	6.923	7.708	7.315	0.0556	7.047	7.595
14	3.812	0,0221	3.281	4.344	3.714	0.0044	3.560	3.873	3.712	0.0048	3.541	3.895	3.734	0.0010	3.598	3.875
15	4.994	0,0169	4.484	5.504	5.027	0.0104	4.879	5.180	5.101	0.0042	4.929	5.281	5.158	0.0153	5.027	5.292
16	6.956	0,0230	6.372	7.540	7.083	0.0052	6.855	7.319	7.150	0.0042	6.858	7.456	7.167	0.0066	6.952	7.388
17	3.305	0,0200	2.773	3.837	3.317	0.0237	3.189	3.449	3.247	0.0020	3.121	3.380	3.365	0.0387	3.258	3.477
18	3.513	0,1327	2.967	4.058	3.550	0.1235	3.429	3.675	3.572	0.1180	3.445	3.706	3.644	0.1001	3.544	3.748
19	4.524	0,0416	4.016	5.031	4.584	0.0288	4.446	4.726	4.633	0.0184	4.476	4.797	4.718	0.0004	4.601	4.839
20	3.571	0,0234	2.978	4.165	3.505	0.0042	3.355	3.661	3.503	0.0037	3.341	3.676	3.536	0.0132	3.408	3.670
21	5.914	0,0193	5.441	6.386	6.004	0.0043	5.813	6.201	5.804	0.0375	5.598	6.019	6.027	0.0004	5.871	6.189
22	4.095	0,0085	3.497	4.692	4.106	0.0059	3.928	4.292	3.960	0.0411	3.781	4.151	4.153	0.0055	4.006	4.306
23	9.807	0,0366	9.306	10.308	10.133	0.0046	9.851	10.422	9.967	0.0210	9.599	10.348	10.055	0.0123	9.785	10.332
24	9.568	0,0384	9.041	10.095	9.616	0.0336	9.304	9.938	9.847	0.0103	9.471	10.238	9.756	0.0195	9.464	10.058
25	8.463	0,0239	7.795	9.131	8.399	0.0312	8.031	8.784	8.011	0.0760	7.640	8.401	8.369	0.0348	8.085	8.663
26	15.820	0,0430	15.010	16.630	16.158	0.0225	15.120	17.268	15.769	0.0460	14.546	17.068	15.589	0.0569	14.693	16.539
27	11.913	0,0431	11.427	12.399	12.162	0.0232	11.795	12.539	12.313	0.0110	11.858	12.783	12.194	0.0206	11.846	12.552
28	14.780	0,0501	14.067	15.494	14.850	0.0456	14.303	15.418	15.196	0.0234	14.538	15.877	14.720	0.0540	14.191	15.269
29	16.785	0,0392	16.019	17.551	17.280	0.0109	16.440	18.163	17.000	0.0269	16.031	18.012	16.734	0.0421	15.986	17.517
30	10.865	0,0325	9.819	11.912	10.487	0.0662	9.922	11.083	10.015	0.1082	9.433	10.630	10.506	0.0645	10.054	10.979
31	7.741	0,0571	6.788	8.695	7.849	0.0440	7.528	8.183	8.029	0.0221	7.605	8.477	8.127	0.0101	7.825	8.442
32	19.355	0,0298	17.602	21.107	18.142	0.0906	16.983	19.379	19.878	0.0036	18.087	21.774	19.676	0.0137	18.356	21.087
33	15.501	0,0408	14.285	16.716	15.305	0.0529	14.513	16.139	14.950	0.0749	14.080	15.861	15.494	0.0412	14.806	16.213
34	8.473	0,0404	7.049	9.897	8.339	0.0556	7.907	8.794	8.674	0.0177	8.044	9.354	8.741	0.0100	8.262	9.249
35	12.392	0,0445	11.315	13.469	12.551	0.0323	12.012	13.115	12.862	0.0083	12.121	13.641	12.803	0.0129	12.256	13.374
36	25.053	0,1751	24.147	25.958	25.353	0.1892	24.289	26.464	25.685	0.2048	24.603	26.786	24.519	0.1501	23.577	25.496
37	24.593	0,1728	23.696	25.490	25.333	0.2081	24.204	26.514	25.102	0.1971	23.980	26.247	25.158	0.1997	24.163	26.191
38	36.133	0,0546	34.746	37.520	36.936	0.0336	35.110	38.858	37.161	0.0277	35.682	38.622	36.607	0.0422	34.926	38.359
39	30.387	0,1476	29.413	31.361	31.054	0.1727	29.615	32.564	31.097	0.1744	29.813	32.388	30.135	0.1380	28.907	31.410
40	45.181	0,0626	43.360	47.003	44.994	0.0665	42.372	47.778	46.127	0.0430	44.434	47.737	43.296	0.1018	40.695	46.035

© Prykhodko N. V., Prykhodko S. B., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-17

The prediction results by model (8) and values of MRE are shown in the Table 2 for two cases: Johnson's univariate and multivariate normalizing transformations. Table 2 also contains the prediction results by linear regression model (9) for values of components of vector **X** from Table 1 and MRE values. The MRE values for the multiple non-linear regression model (8) based on the Johnson multivariate transformation are smaller than for the linear regression model (9) for 25 rows of data: 1, 3–7, 10, 14–16, 18–24, 27, 31, 32, 34–36, 38, 39. Also the MRE values for the non-linear regression model (8) based on the Johnson multivariate transformation are smaller than for the multiple non-linear regression model (10) following the decimal logarithm univariate transformation for 22 rows of data: 1, 2, 4, 5, 7, 10, 14, 18, 19, 21, 22, 24, 27, 30–37, 39. And ones are smaller than for the non-linear regression model (8) following the Johnson univariate transformation for only 18 rows of data: 2, 4, 5, 10, 12, 14, 18, 19, 21–23, 25, 30, 31, 33, 34, 36 and 39.

MMRE and PRED(0.25) are accepted as standard evaluations of prediction results by regression models and equations. The acceptable values of MMRE and PRED(0.25) are not more than 0.25 and not less than 0.75 respectively. The acceptable value of R^2 is approximately the same as for PRED(0.25). The values of R^2, MMRE and PRED(0.25) equal respectively 0.9847, 0.0565 and 1.0 for linear regression model (9), and equal respectively 0.9810, 0.0503 and 1.0 for the model (10), and equal respectively 0.9828, 0.0478 and 1.0 for the model (8) for the Johnson univariate transformation, and equal respectively 0.9818, 0.0443 and 1.0 for the model (8) for the Johnson multivariate transformation. The value of MMRE is better for the model (8) for the Johnson multivariate transformation in comparison with all previous models.

The confidence and prediction intervals of multiple non-linear regression are defined for the data from Table 1. Table 2 contains the lower (LB) and upper (UB) bounds of the confidence intervals of linear and multiple non-linear regressions on the basis of univariate and multivariate transformations respectively for 0.05 significance level. The widths of the confidence interval of multiple non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are smaller than for linear regression (9) for 34 rows of data: 1–25, 27–35. Also the widths of the confidence interval of multiple non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less for more data rows than for multiple non-linear regressions following the univariate transformations, both decimal logarithm and the Johnson. The widths of the confidence interval of multiple non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are smaller than following the decimal logarithm univariate transformation for 37 rows of data: 1–31, 33, 36–40. And ones are smaller than following the Johnson univariate transformation for 34 rows of data: 2, 3, 5, 6, 8–11, 13–37 and 39. Approximately the same results are obtained for the prediction intervals of regressions.

Table 3 contains the lower (LB) and upper (UB) bounds of the prediction intervals of multiple linear and non-linear regressions on the basis of univariate and multivariate transformations respectively for 0.05 significance level. Note the lower bounds of the prediction interval of linear regression (9) are negative for the four rows of data: 1, 4, 5 and 7. All the lower bounds of the prediction interval of multiple non-linear regressions are positive. The widths of the prediction interval of multiple non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are smaller than for linear regression (9) for 35 rows of data: 1–35.

Table 3 – The bounds of the prediction intervals

No	Bounds for linear regression		Bounds for multiple non-linear regression			
			decimal logarithm transformation		Johnson multivariate transformation	
	LB	UB	LB	UB	LB	UB
1	–1.174	4.205	1.186	1.606	1.184	1.431
2	0.689	6.096	2.906	3.966	2.968	3.877
3	0.548	5.939	2.782	3.756	2.850	3.682
4	–0.942	4.431	1.417	1.912	1.439	1.773
5	–0.104	5.278	2.134	2.879	2.050	2.620
6	0.637	6.010	2.855	3.834	2.928	3.775
7	–0.456	4.906	1.817	2.454	1.854	2.341
8	0.615	5.988	2.857	3.829	2.962	3.815
9	0.300	5.664	2.562	3.435	2.658	3.407
10	1.855	7.224	3.955	5.297	4.097	5.340
11	2.740	8.149	4.377	5.955	4.412	5.850
12	0.188	5.550	2.264	3.080	2.284	2.938
13	4.430	9.826	6.291	8.473	6.366	8.416
14	1.133	6.492	3.200	4.310	3.279	4.263
15	2.319	7.669	4.344	5.818	4.517	5.900
16	4.266	9.647	6.117	8.201	6.248	8.229
17	0.625	5.984	2.860	3.847	2.965	3.830
18	0.830	6.195	3.064	4.112	3.209	4.150
19	1.849	7.198	3.961	5.306	4.137	5.390
20	0.879	6.264	3.018	4.070	3.109	4.034
21	3.245	8.582	5.186	6.951	5.268	6.906
22	1.402	6.788	3.535	4.768	3.640	4.748
23	7.133	12.481	8.759	11.722	8.754	11.554
24	6.889	12.246	8.304	11.135	8.489	11.217
25	5.753	11.173	7.231	9.756	7.281	9.627
26	13.072	18.568	13.802	18.916	13.436	18.079
27	9.242	14.584	10.508	14.075	10.607	14.018
28	12.059	17.502	12.810	17.214	12.782	16.948
29	14.049	19.520	14.853	20.103	14.496	19.309
30	8.038	13.692	8.997	12.224	9.107	12.124
31	4.947	10.535	6.763	9.108	7.066	9.356
32	16.197	22.512	15.500	21.234	16.896	22.892
33	12.607	18.394	13.141	17.825	13.420	17.880
34	5.486	11.460	7.160	9.712	7.551	10.127
35	9.554	15.231	10.809	14.575	11.095	14.774
36	22.275	27.831	21.839	29.433	21.321	28.160
37	21.818	27.368	21.804	29.432	21.874	28.896
38	33.163	39.103	31.740	42.984	31.889	41.925
39	27.586	33.188	26.713	36.101	26.235	34.553
40	41.985	48.377	38.533	52.537	37.588	49.717

Also the widths of the prediction interval of multiple non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are smaller for more data rows than for multiple non-linear regressions following the univariate transformations, both decimal logarithm and the Johnson. The widths of the prediction interval of

© Prykhodko N. V., Prykhodko S. B., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-17

multiple non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are smaller than following the decimal logarithm univariate transformation for 38 rows of data: 1–31, 33, 35–40. And ones are smaller than following the Johnson univariate transformation for 26 rows of data: 1, 2, 4–19, 21, 23–26, 28–30.

The null hypothesis that the observed frequency distribution of residuals for linear regression models (7) and (9) is the same as the normal distribution was tested by Pearson's chi-squared test. We can accept the null hypothesis that the distribution of residuals for linear regression model (7) is the same as the normal distribution for normalized data, which normalized by the Johnson multivariate transformation only, since the chi-squared test statistic value equals to 5.59 is smaller than the critical value of the chi-square, which equals to 7.81 for 3 degrees of freedom and 0.05 significance level. The chi-squared test statistic values equal to 60.61, 12.41 and 17.34 respectively for the model (9), the model (7) for normalized data, which normalized by the decimal logarithm univariate transformation and the Johnson univariate transformation for S_B family.

Following [16] multivariate skewness β_1 and kurtosis β_2 are estimated for 40 data rows from Table I and the normalized data on the basis of the decimal logarithm transformation, the Johnson univariate and multivariate transformations for S_B family. The measures β_1 and β_2 allow one to test two hypotheses that are compatible with the assumption of multivariate normality. The estimator of multivariate skewness given by [16]

$$\hat{\beta}_1 = \frac{1}{N^2}\sum_{i-1}^{N}\left\{\left(\mathbf{Z}_i - \overline{\mathbf{Z}}\right)^T \mathbf{S}_N^{-1}\left(\mathbf{Z}_i - \overline{\mathbf{Z}}\right)\right\}^3. \qquad (11)$$

The estimator of multivariate kurtosis given by [16]

$$\hat{\beta}_2 = \frac{1}{N}\sum_{i-1}^{N}\left\{\left(\mathbf{Z}_i - \overline{\mathbf{Z}}\right)^T \mathbf{S}_N^{-1}\left(\mathbf{Z}_i - \overline{\mathbf{Z}}\right)\right\}^2. \qquad (12)$$

In our case, in the formulas (11) and (12), the vectors $\mathbf{Z}$ and $\overline{\mathbf{Z}}$ should be replaced by the vectors $\mathbf{P}$ and $\overline{\mathbf{P}}$ or $\mathbf{T}$ and $\overline{\mathbf{T}}$, respectively, for the initial (non-Gaussian) or normalized data. It is known that $\beta_1 = m(m+1)(m+2)/N$ and $\beta_2 = \mathrm{m}(\mathrm{m}+2)$ hold under multivariate normality. The given equalities are necessary conditions for multivariate normality. In our case $\beta_1 = 3$ and $\beta_2 = 24$. The estimators of multivariate skewness and kurtosis equal 19.38, 4.18, 5.30, 4.65, and 47.37, 23.22, 26.32, 24.29 for the data from Table 1, the normalized data on the basis of the decimal logarithm transformation, the Johnson univariate and multivariate transformations respectively. The values of these estimators indicate that the necessary condition for multivariate normality is practically performed for the normalized data on the basis of the decimal logarithm transformation and the Johnson multivariate transformation, it does not hold for other data.

6 DISCUSSION

As it evident from the Table 3, the values of lower bounds of the prediction intervals of linear regression (9) for estimating the agile testing efforts for small Web projects are negative for some data rows. In our opinion, the presence of negative values may be explained by two reasons. Firstly, for the initial data from Table 1, four basic assumptions that justify the use of linear regression model, one of which is normality of the error distribution, are not valid. Moreover, the chi-squared test statistic value for residuals in linear regression model (9) is larger than for residuals in linear regression model (7) for normalized data, which normalized by the Johnson multivariate transformation, more than 10 times. Secondly, there is reason to reject the hypothesis that the sample of normalized data comes from a multivariate normal distribution. Note all the lower bounds of the prediction intervals of multiple non-linear regressions are positive.

Also note that in our case for the data from Table 1, the poor normalization of multivariate non-Gaussian data using the Johnson univariate transformation leads to an increase in the widths of the confidence and prediction intervals of multiple non-linear regression for a larger number of data rows compared to the Johnson multivariate transformation.

The widths of the confidence and prediction intervals of multiple non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are smaller for more data rows than for linear regression and multiple non-linear regressions following the univariate transformations, both decimal logarithm and the Johnson. Also the MMRE value is smaller for the model (8) for the Johnson multivariate transformation in comparison with all other models, both linear and non-linear, based on univariate transformations. This may be explained best multivariate normalization and the fact that there is no reason to reject the null hypothesis that the distribution of residuals for linear regression model (7) is the same as the normal distribution for normalized data, which normalized by the Johnson multivariate transformation only.

CONCLUSIONS

The important problem of increase of confidence of agile testing effort estimation for small Web projects is solved.

The scientific novelty of obtained results is that the multiple non-linear regression model to estimate the agile testing efforts for small Web projects is firstly constructed on the basis of the Johnson multivariate transformation for S_B family. This model, in comparison with other regression models (both linear and non-linear), has a smaller value of the mean magnitude of relative error, smaller widths of the confidence and prediction intervals of multiple non-linear regression.

The practical significance of obtained results is that the software realizing the constructed model is developed in the sci-language for Scilab. The experimental results

© Prykhodko N. V., Prykhodko S. B., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-17

allow to recommend the constructed model for use in practice.

Prospects for further research may include the application of other multivariate normalizing transformations and data sets to construct the multiple non-linear regression model for estimating the agile testing efforts for small Web projects.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are thankful to Tetiana Avdieieva for the data provided on the agile testing efforts for small Web projects.

REFERENCES

1. Olausson M., Rossberg J., Ehn J., Sköld M. Introduction to Agile Planning, Development, and Testing, *Pro Team Foundation Service*. Berkeley, CA, Apress, 2013, Chapter 2, pp. 9–19. DOI: 10.1007/978-1-4302-5996-1_2
2. Olausson M., Rossberg J., Ehn J., Sköld M. Agile Testing, *Pro Team Foundation Service*. Berkeley, CA, Apress, 2013, Chapter 19, pp. 19–33. DOI: 10.1007/978-1-4302-5996-1_19
3. Penmetsa J. R., Mohanty H., Mohanty J., Balakrishnan A. (eds). Agile Testing, *Trends in Software Testing*. Singapore, Springer, 2017, Chapter 2, pp. 19–33. DOI: 10.1007/978-981-10-1415-4_2
4. Nader-Rezvani N. Agile Quality Test Strategy, *An Executive's Guide to Software Quality in an Agile Organization.* Berkeley, CA, Apress, 2019, Chapter 7, pp. 121–138. DOI: 10.1007/978-1-4842-3751-9_7
5. Agile Testing – Principles, methods & advantages [Electronic resource]. Access mode: https://reqtest.com/testing-blog/agile-testing-principles-methods-advantages/
6. Boehm B. W., Abts C., Brown A. W. et al. Software Cost Estimation with COCOMO II, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 2000, 506 p.
7. Lazić L., Đokić I., Milinković S. Challenges in estimating software testing effort, *Proceedings of INFOTEH-JAHORINA*, 2014, Vol. 13, pp. 637–642.
8. Bates D. M., Watts D. G. Nonlinear Regression Analysis and Its Applications. New York, John Wiley & Sons, 1988, 384 p. DOI:10.1002/9780470316757
9. Seber G.A.F., Wild C. J. Nonlinear Regression. New York, John Wiley & Sons, 1989, 768 p. DOI: 10.1002/0471725315
10. Ryan T.P. Modern regression methods. New York, John Wiley & Sons, 1997, 529 p. DOI: 10.1002/9780470382806
11. Johnson R. A., Wichern D. W. Applied Multivariate Statistical Analysis. Pearson Prentice Hall, 2007, 800 p.
12. Samprit Chatterjee, Jeffrey S. Somonoff. Chatterjee Samprit. Handbook of Regression Analysis. New York, John Wiley & Sons, 2012, 252 p. DOI:10.1002/9781118532843
13. Prykhodko N. V., Prykhodko S. B. Constructing the non-linear regression models on the basis of multivariate normalizing transformations, *Electronic modeling*, 2018, Vol. 40, No. 6, pp. 101–110. DOI: 10.15407/emodel.40.06.101
14. Prykhodko N. V., Prykhodko S. B. The non-linear regression model to estimate the software size of open source Java-based systems, *Radio Electronics, Computer Science, Control,* 2018, No. 3 (46), pp. 158–166. DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-17
15. Prykhodko S., Prykhodko N., Makarova L. et al. Detecting Outliers in Multivariate Non-Gaussian Data on the basis of Normalizing Transformations / [S. Prykhodko, *// Electrical and Computer Engineering : the 2017 IEEE First Ukraine Conference (UKRCON) «Celebrating 25 Years of IEEE Ukraine Section»*. Kyiv, Ukraine, May 29–June 2, 2017, proceedings. Kyiv, IEEE, 2017, pp. 846–849. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100366
16. Mardia K. V. Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications, *Biometrika*, 1970, Vol. 57, pp. 519–530. DOI: 10.1093/biomet/57.3.519

Received 11.01.2019.
Accepted 06.03.2019.

УДК 004.412:519.237.5

МНОЖИННА НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ AGILE ТЕСТУВАННЯ ДЛЯ МАЛИХ ВЕБ-ПРОЕКТІВ

Приходько Н. В. – канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри фінансів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Приходько С. Б. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Оцінювання трудомісткості тестування програмного забезпечення є однією з важливих проблем у розробці програмного забезпечення та життєвому циклі тестування програмного забезпечення. Об'єктом дослідження є процес оцінювання трудомісткості agile тестування для малих веб-проектів. Предметом дослідження є моделі множинної регресії для оцінювання трудомісткості agile тестування для малих веб-проектів.

Мета. Метою роботи є створення моделі множинної нелінійної регресії для оцінювання трудомісткості agile тестування для малих веб-проектів на основі багатовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона.

Метод. Модель, довірчі інтервали та інтервали передбачення багатовимірної нелінійної регресії для оцінювання трудомісткості agile тестування для малих веб-проектів побудовані на основі багатовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона для негаусівських даних за допомогою відповідних методів. Методи побудови моделей, рівнянь, довірчих інтервалів і інтервалів передбачення нелінійних регресій засновані на багатовимірному нелінійному регресійному аналізі з використанням багатовимірних нормалізуючих перетворень. Розглянуто відповідні методи. Ці методи дозволяють враховувати кореляцію між випадковими величинами в разі нормалізації багатовимірних негаусівських даних. Загалом, це призводить до зменшення середньої величини відносної похибки, ширини довірчих інтервалів і інтервалів передбачення в порівнянні з лінійними моделями та нелінійними моделями, побудованими з використанням одновимірних нормалізуючих перетворень.

Результати. Здійснено порівняння побудованої моделі з моделями лінійної регресії та нелінійними регресіями на основі десяткового логарифму та одновимірного перетворення Джонсона.

Висновки. Модель нелінійної регресії для оцінювання трудомісткості agile тестування для малих веб-проектів побудована на основі багатовимірного перетворення Джонсона для сімейства S_B. Ця модель в порівнянні з іншими регресійній моделі (як лінійними, так і нелінійними) має менше значення середньої величини відносної похибки, менші ширини довірчих інтервалів і інтервалів передбачення. Перспективи подальших досліджень можуть включати застосування інших багатовимірних нормалізують перетворень і наборів даних для побудови моделі нелінійної регресії для оцінювання трудомісткості agile тестування для малих веб-проектів.

© Prykhodko N. V., Prykhodko S. B., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-17

КЛЮЧОВІ СЛОВА: agile тестування, оцінювання, трудомісткість тестування, Веб проект, модель множинної нелінійної регресії, багатовимірне нормалізуюче перетворення, негаусівські дані.

УДК 004.412:519.237.5

МНОЖЕСТВЕННАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТРУДОЕМКОСТИ AGILE ТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ ВЕБ-ПРОЕКТОВ

Приходько Н. В. – канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры финансов Национального университету кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Приходько С. Б. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения автоматизированных систем Национального университету кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Оценивания трудоемкости тестирования программного обеспечения является одной из важных проблем в разработке программного обеспечения и жизненном цикле тестирования программного обеспечения. Объектом исследования является процесс оценки трудоемкости agile тестирования для малых веб-проектов. Предметом исследования являются модели множественной регрессии для оценки трудоемкости agile тестирования для малых веб-проектов.

Цель. Цель работы – создание модели нелинейной регрессии для оценки трудоемкости agile тестирования для малых веб-проектов на основе многомерного нормализирующего преобразования Джонсона.

Метод. Модель, доверительные интервалы и интервалы прогнозирования многомерной нелинейной регрессии для оценки трудоемкости agile тестирования для малых веб-проектов построены на основе многомерного нормализирующего преобразования Джонсона для негауссовских данных с помощью соответствующих методов. Методы построения моделей, уравнений, доверительных интервалов и интервалов предсказания нелинейных регрессий основаны на многократном нелинейном регрессионном анализе с использованием многомерных нормализующих преобразований. Рассмотрены соответствующие методы. Методы позволяют учитывать корреляцию между случайными величинами в случае нормализации многомерных негауссовских данных. В общем, это приводит к уменьшению средней величины относительной погрешности, ширины доверительных интервалов и интервалов предсказания по сравнению с линейными моделями и нелинейными моделями, построенными с использованием одномерных нормализующих преобразований.

Результаты. Проведено сравнение построенной модели с линейной моделью и нелинейными регрессионными моделями на основе десятичного логарифма и одномерного преобразования Джонсона.

Выводы. Модель нелинейной регрессии для оценки трудоемкости agile тестирования для малых веб-проектов построена на основе многомерного преобразования Джонсона для семейства S_B. Эта модель по сравнению с другими регрессионными моделями (как линейными, так и нелинейными) имеет меньшее значение средней величины относительной погрешности, меньшие ширины доверительных интервалов и интервалов предсказания. Перспективы дальнейших исследований могут включать применение других многомерных нормализующих преобразований и наборов данных для построения модели нелинейной регрессии для оценки трудоемкости agile тестирования для малых веб-проектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: agile тестирование, оценка, трудоемкость тестирования, Веб проект, модель множественной нелинейной регрессии, многомерное нормализующее преобразования, негаусивськи данные.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Introduction to Agile Planning, Development, and Testing / [M. Olausson, J. Rossberg, J. Ehn, M. Sköld] // Pro Team Foundation Service. – Berkeley, CA: Apress, 2013. – Chapter 2. – P. 9–19. DOI: 10.1007/978-1-4302-5996-1_2
2. Agile Testing / [M. Olausson, J. Rossberg, J. Ehn, M. Sköld] // Pro Team Foundation Service. – Berkeley, CA: Apress, 2013. – Chapter 19. – P. 19–33. DOI: 10.1007/978-1-4302-5996-1_19
3. Agile Testing / [J. R. Penmetsa, H. Mohanty, J. Mohanty, A. Balakrishnan (eds).] // Trends in Software Testing. – Singapore : Springer, 2017. – Chapter 2. – P. 19–33. DOI: 10.1007/978-981-10-1415-4_2
4. Nader-Rezvani N. Agile Quality Test Strategy / N. Nader-Rezvani // An Executive's Guide to Software Quality in an Agile Organization. – Berkeley, CA: Apress, 2019. – Chapter 7.– P. 121–138. DOI: 10.1007/978-1-4842-3751-9_7
5. Agile Testing – Principles, methods & advantages [Electronic resource]. – Access mode: https://reqtest.com/testing-blog/agile-testing-principles-methods-advantages/
6. Boehm B. W. Software Cost Estimation with COCOMO II / [B. W. Boehm, C. Abts, A. W. Brown et al.]. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2000. – 506 p.
7. Lazić L. Challenges in estimating software testing effort / L. Lazić, I. Đokić, S. Milinković // Proceedings of INFOTEH-JAHORINA. – 2014. – Vol. 13. – P. 637–642.
8. Bates D. M. Nonlinear Regression Analysis and Its Applications / D. M. Bates, D. G. Watts. – New York : John Wiley & Sons, 1988. – 384 p. DOI:10.1002/9780470316757
9. Seber G.A.F. Nonlinear Regression / G.A.F. Seber, C.J. Wild. – New York : John Wiley & Sons, 1989. – 768 p. DOI: 10.1002/0471725315
10. Ryan T. P. Modern regression methods / T. P. Ryan. – New York : John Wiley & Sons, 1997. – 529 p. DOI: 10.1002/9780470382806
11. Johnson R. A. Applied Multivariate Statistical Analysis / R. A. Johnson, D. W. Wichern. – Pearson Prentice Hall, 2007. – 800 p.
12. Chatterjee Samprit. Handbook of Regression Analysis / Samprit Chatterjee, Jeffrey S. Somonoff. – New York : John Wiley & Sons, 2012. – 252 p. DOI:10.1002/9781118532843
13. Prykhodko N. V. Constructing the non-linear regression models on the basis of multivariate normalizing transformations / N. V. Prykhodko, S. B. Prykhodko // Электронное моделирование. – 2018. – Т. 40, № 6. – С. 101–110. DOI: 10.15407/emodel.40.06.101
14. Prykhodko N. V. The non-linear regression model to estimate the software size of open source Java-based systems / N. V. Prykhodko, S. B. Prykhodko // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2018. – № 3 (46). – С. 158–166. DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-17
15. Prykhodko S. Detecting Outliers in Multivariate Non-Gaussian Data on the basis of Normalizing Transformations / [S. Prykhodko, N. Prykhodko, L. Makarova et al.] // Electrical and Computer Engineering : the 2017 IEEE First Ukraine Conference (UKRCON) «Celebrating 25 Years of IEEE Ukraine Section», Kyiv, Ukraine, May 29 – June 2, 2017 : proceedings. – Kyiv : IEEE, 2017. – P. 846–849. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100366
16. Mardia K.V. Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications / K. V. Mardia // Biometrika. – 1970. – Vol. 57. – P. 519–530. DOI: 10.1093/biomet/57.3.519

© Prykhodko N. V., Prykhodko S. B., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-17

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 004.514:658.5

МЕТОД ОЦЕНКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ГАЗОБЕТОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Каминская Ж. К. – ассистент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Сердюк С. Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Кулинич Э. М. – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена проблема количественной оценки деятельности оператора автоматизированной системы управления технологическим процессом производства газобетона. Актуальность данной проблемы обуславливается необходимостью учета человеческого фактора при разработке систем данного типа. Объект исследования – эргономическое и инженерно-психологическое обеспечение деятельности оператора автоматизированной системы управления технологическим процессом газобетонного производства. Предмет исследования – модели, методы и средства повышения эффективности деятельности оператора газобетонного производства.

Цель работы – разработка метода, позволяющего провести эргономическую экспертизу деятельности оператора автоматизированной системы управления технологическим процессом на основе количественных показателей данной деятельности, полученных в результате имитационного моделирования, а также верификация метода на примере анализа деятельности оператора автоматизированной системы дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич» (г. Запорожье, Украина).

Метод. Предложено решение рассматриваемой проблемы в виде построения имитационной модели процесса функционирования автоматизированной системы приготовления газобетона и взаимодействия оператора с анализируемым вариантом человеко-машинного интерфейса. Оценка деятельности оператора основывается на сравнительном анализе результатов эксперимента с введенной в модель батареей нормативных и предельных показателей, характеризующих деятельность оператора. В имитационной модели человеко-машинная система «оператор-автоматизированная система» представлена в виде системы массового обслуживания.

Результаты. Разработаны метод и программное обеспечение, позволяющие количественно оценить деятельность оператора автоматизированной системы управления технологическим процессом газобетонного производства.

Выводы. В работе предложен метод количественной оценки деятельности оператора газобетонного производства основанный на стохастической комбинированной модели. Разработанная модель, является дальнейшим развитием комбинированной модели, предложенной авторами ранее. В отличие от комбинированной модели, в стохастической комбинированной модели учтены случайные воздействия на систему «оператор-автоматизированная система» и формализованы действия оператора по устранению этих воздействий. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его для использования на практике при решении задач оценки способов управления технологическим процессом, различных вариантов прототипов человеко-машинного интерфейса с целью их оптимизации для достижения требуемых эффективности и качества деятельности оператора газобетонного производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: имитационная модель, математическая модель, оператор, газобетон, человеко-машинный интерфейс, батарея показателей, коэффициент загруженности.

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

АББРЕВИАТУРЫ

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

АФО – алгоритма функционирования оператора;

ИКВ – известково-кремнеземисто вяжущий;

ИМ – имитационная модель;

ОСМ – обобщенный структурный метод;

ОЭ – обобщенная энтропия системы;

ОНЭ – обобщенная негэнтропия системы;

ПУ – пульт управления;

СКМ – стохастическая комбинированная модель;

ТП – технологический процесс;

ТФЕ – типовая функциональная единица;

ЧМИ – человеко-машинный интерфейс;

ЧМС – человеко-машинная система;

UI – интерфейс пользователя.

НОМЕНКЛАТУРА

$AV(N)$ – множество предельно допустимых значений показателей операторской деятельности;

base5 – среднее время (около 150 мс), необходимое для идентификации пятибуквенного слова с log_{10} частоты 1,0;

e – основание натурального логарифма;

freq – значение log_{10} частоты встречаемости слова;

H – информационная энтропия системы;

H_i – количество информации i-го вида;

$H_{апр}$ – априорная энтропия системы;

$H_{доп}$ – энтропия дополнительной информации, используемой оператором;

$H_{инф}$ – энтропия системы, получаемая от источника сообщений;

$H_{пом}$ – энтропия информации потерянной вследствие помех;

i – возможные состояния системы;

I – количество информации, получаемой оператором от источника сообщений;

$I_{по}$ – количество информации, перерабатываемой оператором;

$|K|$ – определитель корреляционной матрицы;

K_{max} – максимальная длина очереди;

$K_{доп}$ – среднее число сигналов в очереди;

length – длина слова;

m – размерность нормального вектора X;

M – математическое ожидание;

n – число шагов поиска (число фиксаций взгляда), затраченных для нахождения нужного объекта;

N – множество нормативных количественных показателей операторской деятельности;

n_i – i-й нормативный количественный показатель операторской деятельности;

N' – множество количественных показателей операторской деятельности, полученных в результате проведения имитационного эксперимента;

n'_i – i-й количественный показатель операторской деятельности, полученный в результате проведения имитационного эксперимента;

$N_{общ}$ – общее количество поступивших сигналов;

$N_{оч}$ – количество сигналов, обработанных в условиях очереди на обслуживание;

P_i – вероятность нахождения системы в i-м состоянии (появление сигнала i-го типа);

SD – среднеквадратичное отклонение;

t – время информационного поиска;

T – общее время нахождения оператора на рабочем месте;

t_{Fi} – время i-й фиксации взора;

t_{Ri} – время считывания i-го слова (строки);

t_{Si} – время i-го перемещения взора (саккады глаза);

T_{bus} – время занятости оператора;

$T_{зан}$ – максимальный период занятости оператора;

$t_{нраб}$ – общее время, в течение которого оператор не занят обработкой информации;

x – независимое случайное событие;

X – многомерный нормальный вектор;

z – коэффициентом загруженности оператора;

v_i – скорость переработки информации i-го вида;

α – латентный период реакции оператора на сигнал (около 0,2 с);

Δ – определитель нормированной корреляционной матрицы;

λ – интенсивность событий;

π – константа 3,14;

ρ_i – коэффициент очереди;

σ – дисперсия компонентов системы;

τ – время решения задач оператором.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность и качество работы операторов АСУТП во многом определяется степенью учета человеческого фактора при ЧМИ. Современные технологии проектирования компьютерных интерактивных систем описаны в соответствующих руководствах и стандартах, например [1, 2]. Одной из задач, которая решается на предпроектной стадии проектирования ЧМИ, является определение номенклатуры объектов контроля и управления ТП и управляющих функций системы управления в виде «человек-машина», с дальнейшим их перераспределением между человеком-оператором и автоматикой. Для этого последовательно применяют два метода: метод функционального анализа и распределения функций и метод анализа задач. Их недостатком является слишком общее, неформализованное описание предметной области. В результате, они не дают ответ на вопрос о том, как от функций перейти к задачам управления [3], что может привести к необоснованному перераспределению функций и, тем самым, к информационной перегрузке оператора АСУТП.

Актуальность разработки методов, позволяющих определить качество различных макетов ЧМИ на ранних этапах проектирования, обуславливается большими временными и материальными затратами при тестировании конечного варианта ЧМИ с участием реальных пользователей, а также организационными сложностями его проведения.

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

Для сокращения сроков разработки операторских интерфейсов современных АСУТП, проверки правильности распределения функций и оценки интерактивного взаимодействия оператора еще на начальных этапах их проектирования, когда существует лишь «бумажный» прототип интерфейса, может быть использовано имитационное моделирование деятельности оператора, с использованием моделей эмулирующих ТП [4].

Авторами предложена [5] комбинированная (аналитико-имитационная) модель процесса автоматизированного управления ТП приготовления газобетона, позволяющая формализовать как деятельность человека-оператора АСУТП, так и процессы приготовления смеси газобетона. Данная модель может быть использована в качестве эмулятора ТП приготовления газобетона. Недостатком комбинированной модели является то, что в ней, практически, отсутствует учет случайных воздействий на систему «оператор – АСУТП». В ней учтена только наиболее часто встречающаяся в ходе ТП неисправность – зависание материала в бункере сухих.

Объектом исследования является эргономическое и инженерно-психологическое обеспечение деятельности оператора АСУТП газобетонного производства.

Предметом исследования являются модели, методы и средства повышения эффективности деятельности оператора АСУТП газобетонного производства.

Целью данной работы является разработка метода, позволяющего провести эргономическую экспертизу деятельности оператора АСУТП на основе количественных показателей данной деятельности, полученных в результате имитационного моделирования, а также верификация метода на примере анализа деятельности оператора АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич» (г. Запорожье, Украина).

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич» предназначена для выполнения операций дозирования и смешивания компонентов газобетонной смеси. В качестве орудия труда оператор АСУТП использует ЧМИ.

Авторами была разработана комбинированная модель [5], в которой все емкости расходных материалов считались неограниченными и не учитывались иные виды возможных неисправностей, кроме вышеупомянутой. Таким образом, можно говорить о разработке ИМ некоего «идеализированного» процесса функционирования АСУТП приготовления газобетонной смеси.

Для повышения адекватности комбинированной модели целесообразно ее дальнейшее развитие на основе исторических данных о неполадках, собранных в результате производственного эксперимента в АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич». Будем называть такую модель СКМ.

Разрабатываемый метод оценки деятельности оператора заключается в том, что на основе данных имитационных экспериментов, проводимых при помощи СКМ с различными вариантами ЧМИ, можно прогнозировать эффективность и качество процессов управления ТП и проводить эргономическую экспертизу деятельности оператора АСУТП. Данный метод можно использовать как для проверки реальных ЧМИ, так и ЧМИ, существующих в виде «бумажных» прототипов на ранних этапах проектирования АСУТП.

Для оценки деятельности оператора АСУТП возможно использовать номенклатуру предложенных показателей [6, 7]. Тогда, задачей проводимой экспертизы деятельности оператора АСУТП является проверка того, что

$$\forall n_i^{'} \in AV(N).$$

Выполнение данного условия является доказательством того, что деятельность оператора соответствует эргономическим требованиям, а используемый оператором ЧМИ (или его «бумажный» прототип) сочетается с его психофизиологическими возможностями.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Обзор известных моделей процесса дозирования сухих и жидких компонентов ТП приготовления газобетона, их недостатки и пути дальнейших исследований был проведен авторами в [5].

АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона является ЧМС. Научные основы исследования и проектирования деятельности человека в ЧМС изложены в работах отечественных [8–15] и зарубежных ученых [16]. Отмечается [11, 15], что существует большое количество моделей описания и количественной оценки процессов функционирования ЧМС, разработанных различными научными школами: регрессионные модели, марковские и полумарковские процессы, модели теории массового обслуживания, логические автоматы, формальные грамматики, сети Петри, граф-схемы и схемы алгоритмов Ляпунова, логико-лингвистические модели, сети GERT, PERT, функциональные и функционально-семантические сети, вероятностно-алгоритмические функциональные сети и нечетко-алгоритмические модели.

Одним из наиболее известных методов априорной оценки времени выполнения задач человеком с орудием труда в виде ЧМИ, является метод GOMS [16] и GOMS – семейство: KLM-GOMS [17], CMN-GOMS [18], NGOMSL [19] и CPM-GOMS [20]. Развитию этих методов посвящены более сотни исследовательских работ, например [21–23].

Однако, методы GOMS «неожиданно...не получили широкого распространения в качестве инструмента проектирования в UI сообществе» [22]. Причиной этого авторы считают большие трудозатраты на обучение проектировщиков и построение корректных моделей.

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

Сравнительный анализ применения моделей дискретных процессов функционирования в практике проектирования ЧМС проведенный в [13–15, 24], определил выбор авторов в пользу функционально-структурной теории и ОСМ А. И. Губинского [11], как наиболее универсальных. К недостаткам ОСМ следует отнести: применимость только для процессов без последействия и при отсутствии зависимых операций [5]; отсутствие моделей и методов оптимального проектирования ЧМС непосредственно на функциональных сетях, а также отсутствие статистических моделей, методов планирования и обработки результатов испытаний ЧМС [14].

Сравнительный анализ семейства моделей GOMS с методом ОСМ, показал следующее.

Общие достоинства: методы применяются на ранних стадиях проектирования ЧМИ, когда еще отсутствует конечный продукт; дают количественную оценку предполагаемого время выполнения задачи пользователем, что позволяет проводить сравнение альтернативных вариантов; используют иерархию целей.

Общие недостатки: не учитывают квалификацию и особенности работы отдельных пользователей; не учитывают контекст использования (объем предъявляемой информации, ее релевантность и т.д.)

Недостатки семейства GOMS: ограниченный набор операторов модели, что может значительно снизить точность предсказания; зависимость модели от субъективных оценок специалиста; трудность описания параллельных процессов.

GOMS базируется на когнитивной архитектуре, которая часто содержит механизмы для ощущений, восприятия и действий. Хотя ОСМ не акцентирован на когнитивной деятельности, все операторы GOMS, могут быть представлены при помощи ТФЕ. Например, операторы GOMS K, P, H, M и другие, имеющие временную оценку, могут быть формализованы в виде ТФЕ «Рабочая операция» ОСМ. ТФЕ функционер «Альтернативная операция» является примером формализации более сложного элемента когнитивной деятельности человека в ОСМ.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Назначение и состав комплекса дозировочно-смесительного отделения ЗАО «Мотор Сич» был приведен авторами в предыдущей статье [5].

Особенностями операторской деятельности является то, что оператор находится на удалении от объектов контроля и управления и осуществляет свою деятельность опосредованно при помощи информационной модели. В данном случае, в качестве информационной модели оператора АСУТП дозирования материалов служит ЧМИ, состоящий из ПУ, с размещенными на нем средствами индикации, органами управления и набора экранных форм, отображаемых на операторной панели ОР 177В. Это свидетельствует о том, что в операторской деятельности преобладают процессы его информационного взаимодействия с управляемой системой [25].

Разработка СКМ основана на рекомендациях [26] по улучшению надежности составления моделей управления ТП и оптимальности решений оператора, путем введения критериев ОЭ и ОНЭ (мера внутренней упорядоченности системы).

Рассматривая принимаемую оператором информацию как совокупность сведений, уменьшающих его неопределенность в выборе различных возможностей по управлению ТП, в качестве меры неопределенности используем понятие информационной энтропии H [27].

В теории информации для независимых случайных событий x с возможными состояниями $i = 1, 2,\ldots n$ информационная двоичная энтропия рассчитывается по формуле Шеннона:

$$H = -\sum_{i=1}^{n} P_i \log_2 P_i. \quad (1)$$

На изменение энтропии оказывает влияние взаимная зависимость элементов системы. Пусть оператор управляет системой, состояние которой определяется многомерным нормальным вектором X. В этом случае, информационная энтропия определяется по формуле [28]:

$$H = \log\left[(2\pi e)^m |K|\right]^{1/2}. \quad (2)$$

Для случая, когда все компоненты системы имеют одинаковые дисперсии σ, формула (2) примет вид:

$$H = \log\left[(2\pi e)^m \sigma^{2m} \Delta\right]^{1/2}. \quad (3)$$

С увеличением значений коэффициентов корреляции между компонентами величина энтропии уменьшается $H \to -\infty$.

Максимальная неопределенность (энтропия) в системе достигается при отсутствии взаимосвязи между компонентами:

$$H = \log\left[2\pi e \sigma^2\right]^{m/2}. \quad (4)$$

Количество получаемой оператором информации от источника сообщения (информационная модель, отображаемая ЧМИ) определяется по формуле:

$$I = H_{\text{апр}} - H_{\text{инф}}. \quad (5)$$

В процессе решения задач управления, оператор может также использовать дополнительную информацию (например, данные из своей памяти). Возможны также потери информации в процессе ее передачи по техническим каналам АСУТП или же самим оператором (например, вследствие своих ошибок или ограниченности возможностей анализаторов человека). Тогда, общее количество информации, перерабатываемое оператором, определяется по формуле [27]:

$$I_{\text{по}} = H_{\text{инф}} + H_{\text{доп}} - H_{\text{пом}}. \quad (6)$$

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

Количество перерабатываемой оператором информации необходимо для решения следующих эргономических задач [4]: определение степени сложности решаемой задачи; определение степени согласованности скорости поступление информации с пропускной способностью оператора (его психофизиологическими возможностями); определение времени обработки информации.

Время решения задач оператором пропорционально количеству перерабатываемой им информации. Оператор перерабатывает различные виды информации с разной скоростью [7]:

$$\tau = \alpha + \sum_{i=1}^{k} \frac{H_i}{v_i}. \quad (7)$$

Практически, оператор АСУТП газобетонного производства принимает информацию, закодированную алфавитами двух модальностей – зрительной и слуховой. Однако, применение только теории информации, при решении перечисленных выше эргономических задач, не позволяет учесть следующие особенности [7].

1. В процессе переработки поступающей закодированной информации, оператор использует свой внутренний алфавит, а его субъективные вероятности сигналов могут отличаться от объективных.

2. Объектом исследования теории информации являются стационарные процессы, в то время как характеристики оператора изменяются во времени.

3. Теория информации не учитывает семантику информации, которая может значительно повлиять на результаты деятельности оператора.

Указанные недостатки решаются в процессе построения СКМ, которая является аналитико-имитационной моделью. Поэтому в ней, по сравнению с аналитическими моделями [29], проще учесть: изменение состояний системы при случайных воздействиях; нелинейные характеристики элементов системы; дискретный и непрерывный характер элементов и др.

Для решения задач управления и контроля оператор осуществляет информационный поиск необходимых элементов информационной модели (мнемосхемы, экран ЧМИ). Общее время информационного поиска определяется по формуле:

$$t = \sum_{i=1}^{n} (t_{Fi} + t_{Si}). \quad (8)$$

На некоторых шагах своего алгоритма функционирования, оператор выполняет операции считывания текстовой информации, например на шагах 1, 16 [5]. В этом случае вместо времени i-й фиксации взора t_{Fi} в формулу (8) следует подставить значение времени считывания i-го слова (строки) t_{Ri}. Для его расчета воспользуемся результатами моделирования лексической идентификации с использованием стратегии смены внимания [30]. Среднее время лексической идентификации слова (чтения), с центральной фиксацией взора и $\log_{10}$ частоты встречаемости слова рассчитывается по формуле:

$$t_{Ri} = base5 + 15(length - 5) + 40(1 - freq). \quad (9)$$

Расчет времени чтения t_{Ri} в формуле (9) был произведен исходя из следующих положений.

1. Оператор находится на расстоянии 60–70 см от операторной панели и меню экранной формы целиком находится в поле его зрения.

2. Длина каждой строки (меню или информационного сообщения) не более 20 символов, что не превышает области восприятия текста (функционального поля зрения) во время фиксации. Функциональное поле зрения ограничено 3–4 буквами слева от точки фиксации взгляда и 14–15 буквами справа от точки фиксации [31] или до 20 [30].

3. Взгляд фиксировался на центре слова.

4. Возможность рефиксации взгляда не учитывалась.

Стандартное отклонение SD для времени чтения t_{Ri} определяется по формуле [30]:

$$SD = 0{,}1 \times t_{Ri}. \quad (10)$$

Введем в модель батарею показателей [7, 12], характеризующих предельно допустимые нормы деятельности оператора АСУТП.

Информационная нагрузка оператора характеризуется коэффициентом загруженности

$$z = 1 - \frac{t_{\text{нраб}}}{T}. \quad (11)$$

Его предельное значение не должно быть более 0,75 [7, 12].

Ограничение непрерывной (без пауз) работы оператора, определяется показателем максимальный период занятости $T_{\text{зан}}$, который не должен превышать 15 минут [7].

Информационная нагрузка оператора характеризуется, также, таким показателем, как коэффициент очереди ρ, показывающим количество сигналов, обработанных оператором в условиях очереди на обслуживание:

$$\rho = \frac{N_{\text{оч.}}}{N_{\text{общ}}}. \quad (12)$$

Экспериментальным путем определено, что величина ρ не должна превышать 0,4 [7, 12]. Максимально допустимая длина очереди определяется объемом оперативной памяти человека и не должна превышать 5–9 сигналов. Однако рекомендуется [7, 12], чтобы среднее число сигналов в очереди $K_{\text{доп}}$, одновременно удерживаемых в памяти оператора, не превышало 3.

В СКМ, в дополнение к комплексной модели, введены АФО по устранению следующих видов неполадок в ТП или ошибок оператора: отсутствие материалов в бункерах суспензии, сухих материалов (ИКВ и цемента); перегрев электропривода шнека; попадание в шнек инородного тела; попадание на дозаторы посторонних предметов.

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

Приведем АФО для случая отсутствия материала (ИКВ) в одном из бункеров сухих, с указанием ТФЕ, моделирующих реальные операции, выполняемые оператором линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» при помощи ПУ. В этом случае на нем должна мигать кнопка «Авария». Стартовый экран дозировки представлен на рис. 1.

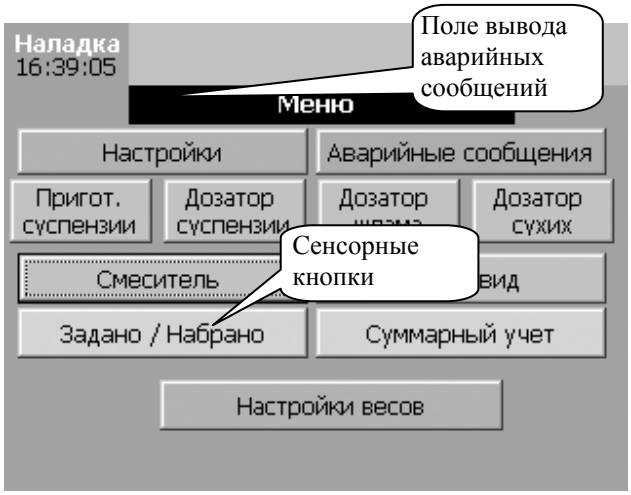


Рисунок 1 – Стартовый экран дозировки

Для устранения данной неисправности оператор и оборудование должны выполнить следующие операции.

1) Начало алгоритма (композиционер «Стартер»).

2) Проверка мигания кнопки «Авария» (контрольная операция $К_1$). В случае мигания, переход на п.3, иначе п. 33 «Конец».

3) Считывание сообщения об ошибке №13 «Ошибка набора веса дозатора сухих!» в поле аварийных сообщений-ошибок (рис. 1) (рабочая операция $Р_1$).

4) Нажатие кнопки F14 на операторной панели, для возврата в основное меню (рабочая операция $Р_2$).

5) Задержка на время открытия формы «Стартовый экран дозировки» (операция задержка $З_1$).

6) Выбор дозатора сухих посредством нажатия соответствующей сенсорной кнопки (рабочая операция $Р_3$).

7) Задержка на время открытия формы «Дозатор сухих» (операция задержка $З_2$).

8) Считывание с фиксацией в памяти/бумаге показаний текущего веса компонентов (рабочая операция $Р_4$).

9) Нажатие кнопки «ДЕБЛОКИРОВКА» на ПУ (рабочая операция $Р_5$).

10) Нажатие кнопки «ПУСК» на ПУ для повтора набора компонентов (рабочая операция $Р_6$).

11) Проверка работы (визуально по мнемосхеме формы «Дозатор сухих») в автоматическом режиме заслонок на выходе дозатора сухих, шнекового питателя или появления других ошибок в поле аварийных сообщений (контрольная операция $К_2$). Если заслонка открылась, шнек сработал и нет других ошибок, то переход на п.31.

12) Проверка давления сжатого воздуха (контрольная операция $К_3$). Если оно в норме, то переход на п.13. Иначе позвонить в компрессорную, дождаться пока давление не увеличится (операция задержка $З_3$), переход на п.9.

13) Переключить тумблер установки режима управления на ПУ в положение «РУЧНОЙ» (рабочая операция $Р_7$).

14) Открыть заслонку на выгрузку посредством нажатия кнопки F6 на операторной панели (рабочая операция $Р_8$).

15) Задержка на время открытия заслонки (операция задержки $З_4$).

16) Если заслонка открылась, то переход на п.18, иначе нажать кнопку F8 на операторной панели (рабочая операция $Р_9$) для закрытия заслонки.

17) Вызов механиков для осмотра/ремонта механизма (операция задержки $З_5$). После устранения поломки перейти на п.14.

18) Включение привода шнека посредством нажатия и удерживания кнопки F2 на операторной панели (рабочая операция $Р_{10}$).

19) Проверка работы шнека (визуально по мнемосхеме формы «Дозатор сухих») (контрольная операция $К_4$). Если шнек работает перейти на п.20, иначе нажать кнопки F4 (рабочая операция $Р_{11}$) и F8 (рабочая операция $Р_{12}$) на операторной панели, для остановки шнека и закрытия заслонок соответственно, перейти к п.17.

20) Считывание показаний текущего веса компонентов (операция задержки $З_6$). Если вес не растет, то п. 21, иначе п. 27.

21) Включение пневмообрушителей нажатием сенсорной кнопки «Обрушение» на экранной форме «Дозатор сухих» (рабочая операция $Р_{13}$).

22) Считывание показаний текущего веса компонентов (операция задержки $З_7$). Если вес не растет, то п. 23, иначе п. 27.

23) Нажатие кнопок F4 (рабочая операция $Р_{14}$) и F8 (рабочая операция $Р_{15}$) на операторной панели для остановки шнека и закрытия заслонок.

24) Звонок обслуживающему персоналу для визуальной проверки наличия материала в бункере. Ожидание ответа (операция задержки $З_8$). Если материала нет, то п.26.

25) Ликвидация обслуживающим персоналом зависания материала в бункере сухих механическим способом (операция задержки $З_9$), переход на п.14.

26) Заполнение обслуживающим персоналом бункера материалом (операция задержки $З_{10}$). После подтверждения наличия материала переход на п.14.

27) Нажатие кнопок F4 (рабочая операция $Р_{16}$) и F8 (рабочая операция $Р_{17}$) на операторной панели для остановки шнека и закрытия заслонок.

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

28) Переключить тумблер установки режима управления на ПУ в положение «АВТОМАТ» (рабочая операция P_{18}).

29) Нажатие кнопки «ДЕБЛОКИРОВКА» на ПУ для сброса аварийного сообщения (рабочая операция P_{19}).

30) Нажатие кнопки «ПУСК» на ПУ для повтора набора компонентов (рабочая операция P_{20}).

31) Проверка динамики изменения веса компонента в дозаторе по показаниям в соответствующем поле мнемосхемы формы «Дозатор сухих» (операция задержки $З_{11}$). Если вес изменяется удовлетворительным темпом, то п. 33 «Конец».

32) Нажатие кнопки «ПРЕРЫВАНИЕ» на ПУ (рабочая операция P_{21}) и переход на п.12.

33) Конец (композиционер «Финишер»).

Суть ОСМ и пример его применения для формализации АФО были представлены авторами при разработке комплексной модели, поэтому в данной статье ОСМ не рассматривался.

Таким образом, получена СКМ, формализующая процессы дозирования и смешивания, а также деятельность оператора АСУТП приготовления смеси газобетона с учетом вероятностных событий.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Имитационное моделирование деятельности оператора линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» проводилось с использованием авторского инструментария. Необходимая информация об инструментарии, способе моделирования и линии приготовления газобетонной смеси была представлена в [5]. Исходными данными для моделирования послужили исторические данные об ошибках и неисправностях в АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич» за 2018 год, полученные из архивов и буферов аварийных сообщений.

В ИМ введены следующие, встречающиеся в ходе ТП неисправности: перегрев электропривода шнека (поступает в модель в соответствии с распределением Пуассона со средней интенсивностью $\lambda = 3{,}47\times10^{-5}$ событий/с); попадание в шнек инородного тела (распределение Пуассона, $\lambda = 2{,}31\times10^{-5}$ событий/с); попадание на дозаторы посторонних предметов (распределение Пуассона, $\lambda = 3{,}5\times10^{-6}$ событий/с); события «Отсутствие материала в бункере» суспензии, ИКВ и сухих материалов происходят с вероятностями 0,03.

Время саккады глаза $t_{Si} = 0{,}15$ с. Величины, соответствующие задержкам $З_1$, $З_2$, $З_4$ были даны в [5]. Время задержек $З_3$, $З_5$, $З_{10}$, распределено по нормальному закону с *M* и *SD* соответственно: 900 с и 300 с; 4920 с и 4020 с; 1200 с и 60 с. Время задержек $З_6$–$З_9$, $З_{11}$ распределено равномерно с *M* и *SD* соответственно: 10±2 с; 15±5 с; 240±60 с; 105±75 с и 15±5 с.

В случае, если действия оператора при перегреве электропривода шнека или попадания в шнек инородного тела не дали положительного результата (вероятность этого события 0,02), он обязан вызвать электрика для их ликвидации. Время вызова электрика и ликвидации неполадок распределено равномерно и составляет 90±30 с, 540±60 с и 1200±600 с соответственно.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Статистические данные, полученные в результате имитационного моделирования ТП при двухсменной работе в течение 30 рабочих дней для рецепта №6, приведены на рис. 2. Графики изменения коэффициента загруженности оператора и средней длины очереди (для варианта диаметра входной заслонки дозатора сухих 150 мм) в течение 30 рабочих дней, приведены на рис. 3 и рис. 4 соответственно. В табл. 1 представлены итоговые статистических данные, полученные при моделировании ТП линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» (диаметр входной заслонки дозатора сухих 150 мм) при помощи двух моделей – комбинированной модели, не учитывающей поток неисправностей в АСУТП [5] и СКМ, представленной в данной статье. Оптимальные или предельно допустимые значения, характеризующие деятельность оператора, приведены в скобках (табл. 1).

Statistics for the work of operators during the month:

Operator rate of employment Z = 0.10 .
Coefficient of queue p = 0.15 .

Operator's busy time T_bus = 2881.94 min.
Maximum uninterrupted operator's busy time T_umax = 5.39 min.
Max queue length K_max = 4 .
The average queue length K_sr = 0.95 .

Total time in queue = 1800.63 min.
Number of queue entries = 456.00 .
Average waiting time in queue = 3.95 min.

Average processing time of information by the operator = 0.03 min.

Рисунок 2 – Фрагмент результатов моделирования

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Авторами было доказано [5], что применение входной заслонки дозатора сухих диаметром 150 мм для линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» является оптимальным. Поэтому, эксперименты с СКМ проводились для рецептов газобетонной смеси №1, №6 и №9 только с заслонкой этого диаметра.

Как следует из данных табл. 1, учет неисправностей привел к ожидаемому увеличению показателей, характеризующих величину информационной нагрузки оператора. Наиболее возрос такой показатель, как коэффициент очереди сигналов на обработку оператором ρ. В соответствие с рис. 2 были получены следующие усредненные показатели за 30 рабочих дней: коэффициент загруженности оператора $z = 0{,}1$; коэффициент очереди на обработку оператором $\rho = 0{,}15$; время занятости оператора $T_{bus} = 2881{,}94$ минут; максимальный период занятости оператора $T_{зан} = 5{,}39$

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

минут; максимальная длина очереди $K_{max} = 4$ сигнала; средняя длина очереди $K_{доп} = 0,95$ сигнала; общее время нахождения сигналов в очереди 1800,63 минуты; количество входов в очередь сигналов 456; среднее время ожидания в очереди 3,95 минуты; среднее время обработки сигнала оператором 0,03 минуты.

Таким образом, только один показатель – максимальная длина очереди K_{max}, превысил рекомендуемое, оптимальное для оператора, значение в 3 сигнала. Однако, это значение не превышает максимальное допустимое значение очереди из 5–9 сигналов.

С учетом того, что установившийся процесс работы в моделируемой системе наступил, начиная с 3–4-го дней, исходя из данных рис. 3, можно отметить, что максимальная загруженность оператора составила $z = 0,15$ в 29-й день моделирования (рецепт № 6), что не превышает допустимого. Как следует из данных рис.4, изменение средней длины очереди сигналов, ждущих обработки оператором, в целом, пропорционально загруженности оператора.

Результаты проведенной выше экспертизы свидетельствует об отсутствии информационных перегрузок оператора при работе с данным вариантом ЧМИ АСУТП газобетонного производства ЗАО «Мотор Сич».

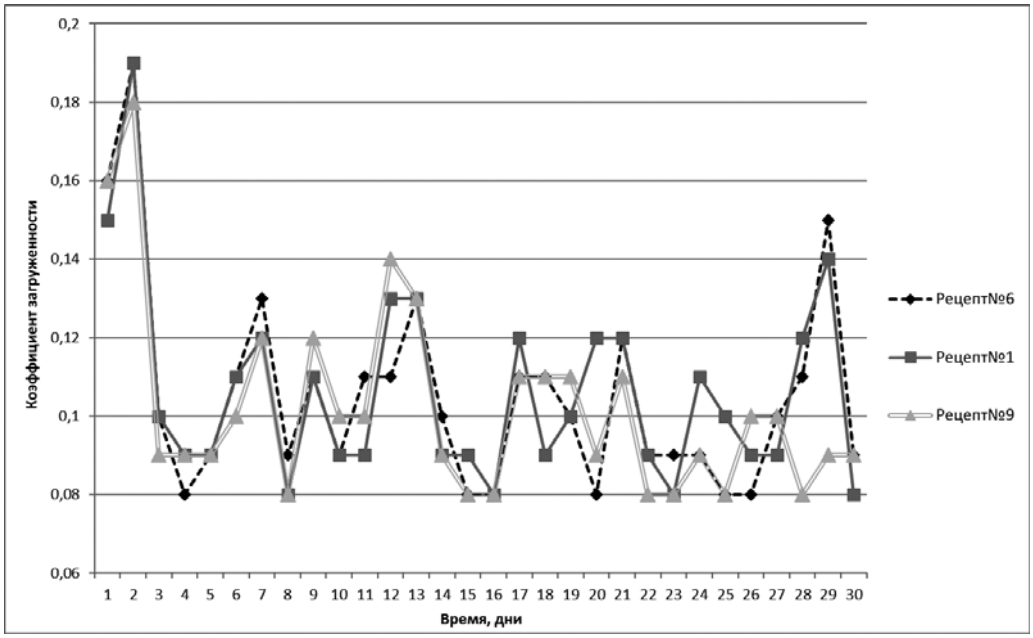


Рисунок 3 – График изменения коэффициента загруженности оператора

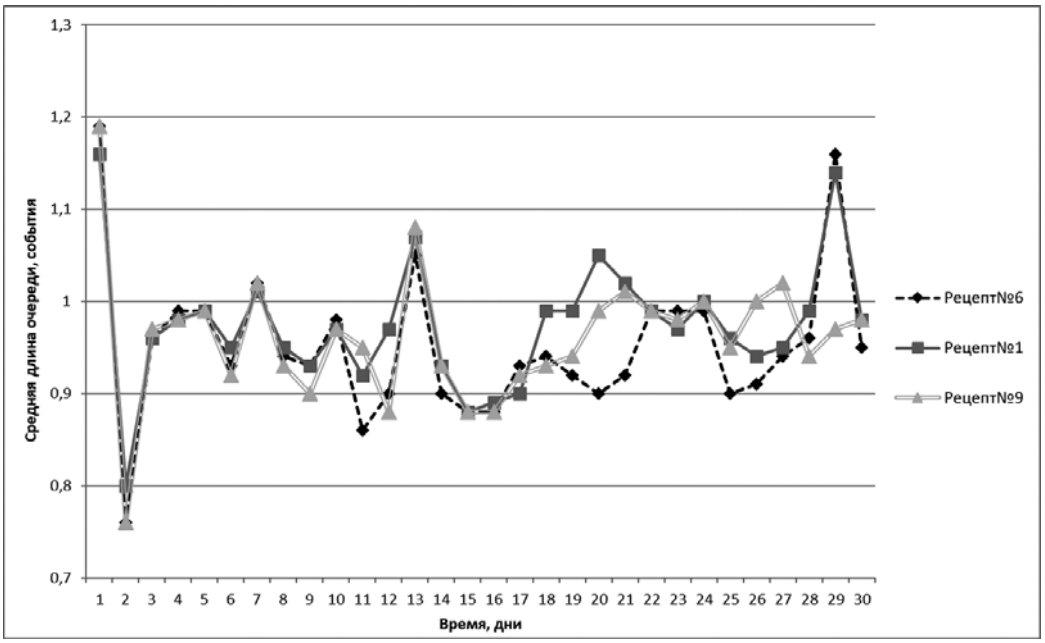


Рисунок 4 – График изменения средней длины очереди

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

Таблица 1 – Показатели, характеризующие технологический процесс и деятельность оператора АСУТП

Показатель	Без учета неисправностей			С учетом неисправностей			Оптимальное (предельное) значение
	Рецепт №1	Рецепт №6	Рецепт №9	Рецепт №1	Рецепт №6	Рецепт №9	
Коэффициент загруженности	0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	(0,75)
Максимальный период занятости, мин	1,31	2,33	2,03	5,32	5,39	5,13	(15 ÷ 20)
Средняя длина очереди	0,46	0,43	0,25	0,97	0,95	0,96	2 ÷ 3
Максимальная длина очереди	2	2	2	4	4	4	(5 ÷ 9)
Коэффициент очереди	0,01	0,01	0,01	0,15	0,14	0,14	0,4
Период цикла ТП, с	656	780	752	751	924	829	Директивное время 1020

К недостаткам СКМ можно отнести трудоемкость процессов сбора и обработки данных, с целью определения вероятностных характеристик появления событий в АСУТП, необходимость получения части исходных данных из заполняемого вручную эксплуатационного журнала, а также извлечение из обслуживающего персонала экспертных знаний об аварийных ситуациях и опыте их разрешения за длительный период эксплуатации, что требует введения более развитых механизмов их фиксации, формализации, сбора и хранения.

ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная задача по разработке метода количественной оценки деятельности оператора АСУТП газобетонного производства. Метод основан на разработанной в данной работе СКМ, которая является дальнейшим развитием комбинированной модели процесса автоматизированного управления ТП приготовления газобетона [5]. Учет в СКМ случайных воздействий на систему «оператор – АСУТП» повысил адекватность имитационной модели и достоверность полученных результатов моделирования.

Научной новизной работы, является предложенная СКМ, которая в отличие от комбинированной модели процесса автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона, позволяет формализовать деятельность человека-оператора АСУТП в условиях случайных воздействий на систему «оператор – АСУТП», что повышает адекватность имитационной модели и достоверность полученных результатов моделирования.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанный метод и программное обеспечение могут быть использованы на ранних этапах проектирования АСУТП, для оценки способов управления ТП, различных вариантов прототипов ЧМИ с целью их оптимизации для достижения требуемых эффективности и качества деятельности оператора.

Перспективы дальнейших исследований состоят в развитии предложенного математического обеспечения, с целью применения в интеллектуальных тренажерах для подготовки операторов газобетонного производства или производств со сходными физическими процессами (дискретно-непрерывное производство).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность руководству НПО «ЭТНА» (г. Запорожье) за предоставленные результаты производственного эксперимента линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич».

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Burns C. M. Ecological interface design / C. M. Burns, J. R. Haidukiewicz. – Boca Raton : CRC Press, 2004. – 344 p.
2. Ergonomics of human-system interaction. Part 210. Human-centred design for interactive systems: ISO 9241-210:2010 [Effective from 2010-03-15]. – Geneve: ISO, 2010. – 32 p.
3. Анохин А. Н. Методы предпроектного анализа при создании операторского интерфейса / А. Н. Анохин, В. С. Малишевский // Труды II Международной научно-практической конференции «Человеческий фактор в сложных технических системах и средах» (Санкт-Петербург, Россия, 6–9 июля 2016). – СПб.: Межрегиональная эргономическая ассоциация, ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», Северная звезда, 2016. – С. 357–363.
4. Сердюк С. М. Ергономічні питання проектування людино-машинних систем : навч. посібник / С. М. Сердюк. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2013. – 319 с. ISBN 978-617-529-093-4
5. Моделирование и анализ процессов функционирования автоматизированной системы управления технологическим процессом производства газобетона / [Ж. К. Каминская, Э. М. Кулинич, С. Н. Сердюк] // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2018. – № 4. – С. 214–225. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-21
6. Душков Б. А. Основы инженерной психологии : учебник для студентов вузов / Б. А. Душков, А. В. Королев, Б. А. Смирнов. – М. : Академический проект, 2002. – 576 с.
7. Смирнов Б. А. Инженерная психология. Практические занятия / Б. А. Смирнов. – К. : Вища школа, 1979. – 192 с.
8. Венда В. Ф. Инженерная психология и синтез систем отображения информации / В. Ф. Венда. – М. : Машиностроение, 1982. – 344 с.
9. Зинченко В. П. Эргономика. Ориентированное на человека проектирование / В. П. Зинченко, В. М. Мунипов. – М. : Тривола, 1995. – 480 с.
10. Крылов А. А. Человек в автоматизированных системах управления / А. А. Крылов. – Л. : ЛГУ, 1972. – 192 с.
11. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытание. Справочник / А. Н. Адаменко, А. Т. Ашеров, И. Л. Бердников и др. ; под общ. ред. А. И. Губинского. – М. : Машиностроение, 1993. – 528 с.
12. Справочник по инженерной психологии / Под ред. Б. Ф. Ломова. – М. : Машиностроение, 1982. – 368 с.

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

13. Петухов И. В. Система поддержки принятия решений при оценке профпригодности оператора эргатических систем (на примере транспортно-технологических машин): автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.13.01 / И. В. Петухов. – Уфа, 2013. – 35 с.
14. Цой Е. Б. Вероятностное моделирование по группированным данным при исследовании и проектировании человеко-машинных систем: автореф. дис. … д-ра техн. наук. 05.13.01 / Е. Б. Цой. – Новосибирск, 1997. – 49 с.
15. Гриф М. Г. Автоматизация проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем по вероятностным и нечетким показателям: дис. … д-ра техн. наук. 05.13.17 / М. Г. Гриф. – Новосибирск, 2002. – 270 с.
16. Card S. K. The Psychology of Human-Computer Interaction / S. K. Card, A. Newell, T. P. Moran. – Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, USA. 1983. – 469 p. ISBN:0898592437
17. Card S. K. The keystroke-level model for user performance time with interactive systems / S. K. Card, T. P. Moran, A. Newell // Communications ACM. – 1980. – Vol. 23, Issue 7 (July). – P. 396–410. DOI: 10.1145/358886.358895
18. Lerch F. J. Skilled financial planning: the cost of translating ideas into action / F. J. Lerch, M. M. Mantei, J. R. Olson // Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, New York, March 1989 : proceedings. – New York: ACM, 1989. – P. 121–126. DOI: 10.1145/358886.358895
19. Kieras D. E. A Guide to GOMS model usability evaluation using NGOMSL / D. E. Kieras // The Handbook of Human-Computer Interaction. 2nd ed. – 1997. – Ch. 7, Ch. 31. Elsiver Science B. V. – P. 135–157, 733–767. DOI: 10.1016/B978-0-444-81862-1.X5065-1
20. Gray W. D. Project Ernestine: A validation of GOMS for prediction and explanation of real-world task performance / W. D. Gray, B. E. John, M. E. Atwood // Human-Computer Interaction. – 1993. – Vol. 8, Issue 3. – P. 237–309. DOI: 10.1207/s15327051hci08 03_3
21. John B. E. The GOMS Family of User Interface Analysis Techniques: Comparison and Contrast / B. E. John, D. E. Kieras // ACM Transactions on Computer-Human Interaction. – 1996. – Vol. 3, Issue 4, Dec. – P. 320–351. DOI: 10.1145/235833.236054
22. Predictive Human Performance Modeling Made Easy / [B. E. John, K. Prevas, D. D. Salvucci, K. Koedinger] // Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, New York, 24-29 April 1989: proceedings. – New York : ACM, 1989. – P. 121–126. DOI: 10.1207/s15327051hci0803_3.
23. Keystroke-level model for advanced mobile phone interaction / [P. Holleis, F. Otto, H. Hussmann, A. Schmidt] // Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, San Jose, April 28. – May 03, 2007: proceedings. – New York: ACM, 2007. – P. 1505–1514. DOI: 10.1145/1240624.1240851
24. Барченко Н. Л. Ергономічне забезпечення діалогової людино-машинної взаємодії в модульних системах електронного навчання: автореф. дис. … канд. техн. наук. 05.01.04 / Н. Л. Барченко. – Харків, 2019. – 25 с.
25. Психология труда: учебник и практикум для академического бакалавриата / А. В. Карпов [и др.]; под ред. А. В. Карпова. – М. : Издательство Юрайт, 2016. – 364 с. ISBN 978-5-9916-5320-6
26. Прангишвили И. В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами / И. В. Прангишвили. – М. : Наука, 2003. – 428 с.
27. Душков Б. А. Психология труда, профессиональной информационной и организационной деятельности : словарь / Б. А. Душков, Б. А. Смирнов, А. В. Королев ; под ред. Б. А. Душкова. – М. : Академический Проект: Фонд «Мир», 2005. – 848 с.
28. Энтропийные методы в теории самоорганизационных процессов / Е. С. Переверзев // Техническая механика. – 2010. – № 3. – С. 81–90
29. Советов Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М. : Высш. шк., 2001. – 343 с.
30. Reilly R. Eye movement control in reading: A simulation of some word-targeting strategies / R. Reilly, J. K. O'Regan // Vision Research. – 1998. – № 38. – P. 303–317.
31. Rayner K. Integrating information across eye movements / K. Rayner, G. W. McConkie, D. Zola // Cognitive Psychology. – 1980. – № 12. – P. 206–226.

Статья поступила в редакцию 06.02.2019.
После доработки 25.03.2019.

УДК 004.514:658.5

МЕТОД ОЦІНКИ ДІЯЛЬНОСТІ ОПЕРАТОРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ГАЗОБЕТОННОГО ВИРОБНИЦТВА

Камінська Ж. К. – асистент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Сердюк С. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Кулинич Е. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри електроприводу і автоматизації промислових установок, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто проблему кількісної оцінки діяльності оператора автоматизованої системи управління технологічним процесом виробництва газобетону. Актуальність даної проблеми обумовлюється необхідністю врахування людського фактора при розробці систем даного типу. Об'єкт дослідження – ергономічне та інженерно-психологічне забезпечення діяльності оператора автоматизованої системи управління технологічним процесом газобетонного виробництва. Предмет дослідження – моделі, методи і засоби підвищення ефективності діяльності оператора газобетонного виробництва.

Мета роботи – розробка методу, який дозволяє провести ергономічну експертизу діяльності оператора автоматизованої системи управління технологічним процесом на основі кількісних показників даної діяльності, отриманих в результаті імі-

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

таційного моделювання, а також верифікація методу на прикладі аналізу діяльності оператора автоматизованої системи дозування матеріалів для виготовлення газобетону на ЗАТ «Мотор Січ» (Запоріжжя, Україна).

Метод. Запропоновано рішення розглянутої проблеми у вигляді побудови імітаційної моделі процесу функціонування автоматизованої системи приготування газобетону і взаємодії оператора з варіантом людино-машинного інтерфейсу, що аналізується. Оцінка діяльності оператора грунтується на порівняльному аналізі результатів експерименту з введеною в модель батареєю нормативних та граничних показників, що характеризують діяльність оператора. В імітаційній моделі людино-машинна система «оператор-автоматизована система» представлена у вигляді системи масового обслуговування.

Результати. Розроблено метод і програмне забезпечення, що дозволяють кількісно оцінити діяльність оператора автоматизованої системи управління технологічним процесом газобетонного виробництва.

Висновки. В роботі запропоновано метод кількісної оцінки діяльності оператора газобетонного виробництва заснований на стохастичній комбінованій моделі. Модель, що розроблялася, є подальшим розвитком комбінованої моделі, запропонованої авторами раніше. На відміну від комбінованої моделі, в стохастичній комбінованій моделі враховані випадкові впливи на систему «оператор-автоматизована система» та формалізовані дії оператора щодо усунення цих впливів. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого математичного забезпечення і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при вирішенні завдань оцінки способів управління технологічним процесом та різних варіантів прототипів людино-машинного інтерфейсу з метою їх оптимізації для досягнення необхідних ефективності та якості діяльності оператора газобетонного виробництва.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: імітаційна модель, математична модель, оператор, газобетон, людино-машинний інтерфейс, батарея показників, коефіцієнт завантаженості.

UDC 004.514:658.5

THE METHOD OF OPERATOR'S ACTIVITY ESTIMATION FOR THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM IN AERATED CONCRETE PRODUCTION

Kaminska Zh. K. – Assistant of the Software Tools Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Serdiuk S. N. – PhD, Associate Professor, Software Tools Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Kulynych E. M. – PhD, Associate Professor, Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of quantitative estimation of the Automated Control System operator's activity for aerated concrete production is considered. The relevance of the problem is determined by the need to take into account the human factor in the development of systems of this type. The research object is the ergonomic and psychological-engineering support in the activity of Automated Control System operator for aerated concrete production. Models, methods and means for increasing the efficiency of the operator's activity are the research subject for a type of the manufacturing considered.

Objective. The method of conducting an ergonomic examination of the Automated Control System operator's activity based on quantitative indicators of this activity was proposed as a solution. The quantitative indicators were obtained as the results of a simulation. The method verification took place by the example of the analysis of Automated Control System operator's activity in dosing materials for manufacturing aerated concrete at JSC "Motor Sich" (Zaporizhzhia, Ukraine).

Method. The solution offered includes the imitation model of Automated Control System operating process for the aerated concrete preparation and operator's interaction with the analyzed human-machine interface version. The estimation of the operator's activity is based on a comparative analysis of the results of an experiment with a battery of regulating and marginal indicators introduced into the model as for characterizing the operator's activities. The "operator-Automated Control System" human-machine system incorporated into the imitation model is presented as a queuing system.

Results. The research resulted in software to realize the offered method of quantitative estimation of the Automated Control System operator's activity for aerated concrete production.

Conclusions. The research proposes the method of quantitative estimation of operator's activity for aerated concrete production based on a stochastic combined model. Offered model is a further development of the combined model proposed by the authors earlier. Unlike the combined model, the stochastic combined model takes into account random effects in the "operator-Automated Control System" system and the operator's activity formalization to eliminate such impacts. The conducted experiments have proved the operability of the software offered; such software can be recommended to be used while justifying the control methods, different human-machine interface prototypes variants to keep them optimized on criteria of the required efficiency and quality concerning the operator's activity for aerated concrete production.

KEYWORDS: imitation model, mathematical model, operator, aerated concrete, human-machine interface, battery of indicators, load factor.

REFERENCES

1. Burns C. M., Haidukiewicz J. R. Ecological interface design. Boca Raton, CRC Press, 2004, 344 p.
2. Ergonomics of human-system interaction. Part 210. Human-centred design for interactive systems: ISO 9241-210:2010 [Effective from 2010-03-15]. Geneve, ISO, 2010, 32 p.
3. Anohin A. N., Malishevskiy V. S. Metodyi predproektnogo analiza pri sozdanii operatorskogo interfeysa, Trudyi II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Chelovecheskiy faktor v slozhnyih tehnicheskih sistemah i sredah» (Sankt-Peterburg, Rossiya, 6–9 iyulya 2016). SPb,

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

Mezhregionalnaya ergonomicheskaya assotsiatsiya, FGAOU DPO «PEIPK», Severnaya zvezda, 2016, pp. 357–363.
4. Serdiuk S. M. Erhonomichni pytannya proektuvannya lyudyno-mashynnykh system, Navchalnyy posibnyk. Zaporizhzhya, ZNTU, 2013, 319 p. ISBN 978-617-529-093-4 (In Ukrainian)
5. Kaminska Zh. K., Kulynych E. M., Serdiuk S. N., Modelirovanie i analiz protsessov funktsionirovaniya avtomatizirovannoy sistemyi upravleniya tehnologicheskim protsessom proizvodstva gazobetona, Radio Electronics, Computer Science, Control, 2018, No. 4, pp. 214–225. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-21
6. Dushkov B. A., Korolev A. V., Smirnov B. A. Osnovyi inzhenernoy psihologii. Uchebnik dlya studentov vuzov. Moscow, Akademicheskiy proekt, 2002, 576 p.
7. Smirnov B. A. Inzhenernaya psihologiya. Prakticheskie zanyatiya. Kyev, Vischa shkola, 1979, 192 p.
8. Venda V. F. Inzhenernaya psihologiya i sintez sistem otobrazheniya informatsii. Moscow, Mashinostroenie, 1982, 344 p.
9. Zinchenko V. P., Munipov V. M. Ergonomika. Orientirovannoe na cheloveka proektirovanie. Moscow, Trivola, 1995, 480 p.
10. Kryilov A. A. Chelovek v avtomatizirovannyih sistemah upravleniya. Leningrad, LGU, 1972, 192 p.
11. Adamenko A. N., Asherov A. T., Berdnikov I. L. i dr. ; pod obsch. red. A. I. Gubinskogo. Informatsionno-upravlyayuschie cheloveko-mashinnyie sistemyi: issledovanie, proektirovanie, ispyitanie. Spravochnik. Moscow, Mashinostroenie, 1993, 528 p.
12. Spravochnik po inzhenernoy psihologii. Pod red. B. F. Lomova. Moscow, Mashinostroenie, 1982, 368 p.
13. Petuhov I. V. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy pri otsenke profprigodnosti operatora ergaticheskih sistem (na primere transportno-tehnologicheskih mashin): avtoref. dis. … d-ra tehn. nauk: 05.13.01. Ufa, 2013, 35 p.
14. Tsoy E. B. Veroyatnostnoe modelirovanie po gruppirovannyim dannyim pri issledovanii i proektirovanii cheloveko-mashinnyih sistem: avtoref. dis. … d-ra tehn. nauk. 05.13.01. Novosibirsk, 1997, 49 p.
15. Grif M. G. Avtomatizatsiya proektirovaniya protsessov funktsionirovaniya cheloveko-mashinnyih sistem po veroyatnostnyim i nechetkim pokazatelyam: dis. … d-ra tehn. nauk. 05.13.17. Novosibirsk, 2002, 270 p.
16. Card S. K., Newell A. and Moran T. P. The Psychology of Human-Computer Interaction. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, USA. 1983, 469 p. ISBN: 0898592437
17. Card S. K., Moran T. P., Newell A. The keystroke-level model for user performance time with interactive systems *Communications ACM,* 1980, Vol. 23, Issue 7 (July), pp. 396–410. DOI: 10.1145/358886.358895
18. Lerch F. J., Mantei M. M., Olson J. R. Skilled financial planning: the cost of translating ideas into action, *Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, New York, March 1989: proceedings.* New York: ACM, 1989, pp. 121–126. DOI: 10.1145/358886.358895
19. Kieras, D. E. A Guide to GOMS model usability evaluation using NGOMSL, *The Handbook of Human-Computer Interaction. 2nd ed., 1997, Ch. 7, Ch. 31. Elsiver Science B. V.*, pp. 135–157, 733–767. DOI: 10.1016/B978-0-444-81862-1.X5065-1
20. Gray W. D., John B. E., Atwood M. E. Project Ernestine: A validation of GOMS for prediction and explanation of real-world task performance, *Human-Computer Interaction*, 1993, Vol. 8, Issue 3, pp. 237–309. DOI: 10.1207/s15327051hci08 03_3.
21. John B. E., Kieras D. E. The GOMS Family of User Interface Analysis Techniques: Comparison and Contrast, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 1996, Vol. 3, Issue 4, Dec., pp. 320–351. DOI: 10.1145/ 235833.236054
22. John B. E., Prevas K., Salvucci D. D., Koedinger K. Predictive Human Performance Modeling Made Easy *Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, New York, 24–29 April 1989: proceedings*. New York, ACM, 1989, pp. 121–126. DOI: 10.1207/s15327051hci0803_3.
23. Holleis P., Otto F., Hussmann H., Schmidt A. Keystroke-level model for advanced mobile phone interaction, *Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, San Jose, April 28 – May 03, 2007: proceedings.* New York: ACM, 2007, pp. 1505–1514. DOI: 10.1145/1240624.1240851
24. Barchenko N. L. ErgonomIchne zabezpechennya dialogovoyi lyudino-mashinnoyi vzaemodiyi v modulnih sistemah elektronnogo navchannya: avtoref. dis. … kand. tehn. nauk. 05.01.04. Harkiv, 2019, 25 p. (In Ukrainian)
25. Karpov A. V. i dr.; pod red. A. V. Karpova. Psihologiya truda: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata. Moscow, Izdatelstvo Yurayt, 2016, 364 p. ISBN 978-5-9916-5320-6
26. Prangishvili I. V. Entropiynyie i drugie sistemnyie zakonomernosti: Voprosyi upravleniya slozhnyimi sistemami. Moscow, Nauka, 2003, 428 p.
27. Dushkov B. A., Smirnov B. A., Korolev A. V. Psihologiya truda, professionalnoy informatsionnoy i organizatsionnoy deyatelnosti: Slovar. Pod red. B. A. Dushkova. Moscow, Akademicheskiy Proekt: Fond «Mir», 2005, 848 p.
28. Pereverzev E. S. Entropiynyie metodyi v teorii samoorganizatsionnyih protsessov, *Tehnicheskaya mehanika*, 2010, No. 3, pp. 81–90
29. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. Modelirovanie sistem. Moscow, Vyissh. shk., 2001, 343 p.
30. Reilly R., O'Regan J. K. Eye movement control in reading: A simulation of some word-targeting strategies, *Vision Research*, 1998, No. 38, pp. 303–317
31. Rayner K., McConkie G. W., Zola D. Integrating information across eye movements, *Cognitive Psychology,* 1980, No. 12, pp. 206–226.

© Каминская Ж. К., Сердюк С. Н., Кулинич Э. М., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-19

e-ISSN 1607-3274 Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. № 2
p-ISSN 2313-688X Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2

UDC 681.527.2

LINEARIZATION OF OBJECT MODEL WITH VECTOR CONTROL

Kulanina Y. V. – PhD, Senior lecturer of the Electrical Machines Department, Zaporizhzhia National Technical University, Ukraine.

Yarymbash D. S. – Dr. Sc., Associate Professor, Head of the Electrical Machines Department, Zaporizhzhia National Technical University, Ukraine.

Kotsur M. I. – PhD, Associate Professor, Electrical and Electronic Apparatuses Department, Zaporizhzhia National Technical University, Ukraine.

Yarymbash S. T. – PhD, Associate Professor, Electrical Machines Department, Zaporizhzhia National Technical University, Ukraine.

ABSTRACT

Context. A sufficient number of ways to implement vector control algorithms are very complex and in most cases tend to mismatch the vector of the resulting parameters of the control object. Therefore, there is a need to simplify complex non-linear vector control systems and apply linear dynamic models of a non-linear object with vector control for them. Currently, for a complex vector control system, there are no sufficiently accurate equivalent simple models. Development of reliable simple dynamic models will allow to design a vector control system with maximum use of linear methods of synthesis and analysis.

Objective. The goal of the paper is development of linear dynamic model of a non-linear object with vector control, which reproduces its dynamics accurately enough for practice.

Method. The following methods were used to solve the problems posed: the state space method for describing the operation of control systems; filtering theory, in particular, observers for estimation state vectors, uncertainties, and parameter identification; modal control methods for the synthesis of observers and regulators; numerical simulation method to illustrate the performance of synthesized control systems; vector control of a nonlinear object.

Results. For the investigated robust vector control system of the object with a substantial non-linearity of properties and characteristics, simple linear equivalent mathematical models were compiled, rather accurately reproducing the operation of the original system in all modes of operation. Simplification of mathematical models is achieved by considering the dynamics of the entire system in a synchronous basis, robust methods for controlling parameters, and by neglecting really small errors in the work of regulators and observers. The synthesized models, as well as the original nonlinear system, have the property of robustness due to the use of combined control.

Conclusions. The simplicity and linearity of the equivalent system allows us to synthesize the control laws of the original nonlinear system by well-developed linear methods with significantly less time spent on modeling. Numerical simulation of the dynamics of the original nonlinear and equivalent linear systems showed a good agreement between transient and stationary processes.

KEYWORDS: model, linearity, control, observer, robustness.

ABBREVIATIONS

IM is an Induction Motor;
VCis a Vector Control;
HACS is High-tech Automated Control System;
EMD is an Electric Motor Device;
CD is a Converting Device;
ACS is an Automatic Control System;
EM is an Executive Device;
CO is a control object;
TS is a Technological System;
PSS is a Power Supply System;
S is a Source;
ES is an Elastic System;
FC is a Frequency Converter;
PWM is a Pulse-Width Modulation;
CTC is a Combined Torque Controller;
CCC is a Combined Current Controller.

NOMENCLATURE

$i_{\alpha\beta}$ is a vector of parameters of currents reduced to basis (α,β);

$u_{\alpha\beta}$ is a vector of parameters of volteges reduced to basis (α,β);

i_p is a program value of the current parameter;

«^» is a symbol for evaluating the corresponding variables,

ω_0 is a parameter of the vector velocity flux linkage ψ in the bases (α,β);

ϑ is a rotation angle of the working body of the control object;

ω is a speed parameter;

ω_p is a program speed parameter;

m_0 is a desired parameter of the electromagnetic moment of the control object;

m is a parameter of the electromagnetic moment of the control object;

m_p is a program parameter of the electromagnetic moment of the control object;

$\vec{i}_{dqp}$ is a vector of the program current parameters written in synchronous basis (d,q);

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

$\vec{u}_{dqp}$ is a vectors of the program voltage parameters written in the synchronous basis (d,q);

u_p is a programmatic signal corresponding to the desired input parameters voltage of the control object;

u is a voltage parameter of the control object;

m_l is a load moment parameter of the control object;

m_f is a parameter of the friction point of the control object;

I is a parameter of the rotor inertia moment of the control object;

ψ_d is a parameter of the vector flux module of the control object;

n is a constructive parameter of the number pairs poles of the management object;

L_s is a stator inductance parameters of the control object;

L_r is a rotor inductance parameters of the control object;

L_m is a parameters of the mutual inductance of the stator and the rotor of the control object;

T_r is a rotor time constant parameter of the control object;

R_s is a parameter of stator resistance of the control object;

R_r is a parameter of rotor resistance of the control object;

R_{s0} is a parameter of the nominal value stator resistance of the control object;

R_{r0} is a parameter of the nominal value rotor resistance of the control object;

ϑ is a parameter of the rotor movement of the control object;

ϑ_p is a program parameter of the rotor movement of the control object;

I_0 is a deterministic part of the current parameter of the control object;

m_0 is a deterministic part of the electric moment parameter of the control object;

L_{m0} is a deterministic part of the mutual inductance parameter of the control object;

L_{r0} is a deterministic part of the rotor inductance parameter of the control object;

J_δ is an unknown error of the moment inertia value of the control object;

m_δ is an unknown error of the electric moment value of the control object;

$L_{m\delta}$ is an unknown error of the mutual inductance value of the control object;

$L_{r\delta}$ is an unknown error of the rotor inductance value of the control object;

σ is a scattering coefficient;

p is a differentiation operator (subscript p indicates program value);

k_1 is a transmission coefficient of FC wich taking into account changes in voltage parameters;

$R_{s\delta}$ is a value error of the parameter stator resistance of the control object;

$k_{1\delta}$ is a transfer coefficient error;

$L_{s\delta}$ is a value error of the stator inductance parameter of the control object;

$\vec{q}$ is a vector of constant coefficients;

$\hat{\psi}$ is an estimation of the rotor flux vector of the control object;

$\hat{\psi}^*$ is an estimation of the program rotor flux vector of the control object;

$e_{\alpha\beta}$ is a projection EMF of the control object;

e_0 is a nominal value of the stator EMF vector of the control object;

$\hat{e}_\delta$ is an error estimation of the stator emf vector of the control object;

$\vec{l}$ is a vector of constant transmission coefficients of the observer, defining its characteristics;

ω_{sl} is a sliding of the control object;

α is a temperature coefficient of the control object.

INTRODUCTION

The problem of control uncertain objects is one of the most common tasks of the control theory . A special place in the class of controlled systems is occupied by objects, the dynamic processes in which are described by nonlinear differential equations. Due to the large variety of nonlinear functions, included in the mathematical models of such objects, individual approaches are used in the design of control systems.

For the most part, approaches and methods based on the direct Lyapunov method [1], the differential-geometric theory of differential equations [2–4] and the theory of constructing equivalent mathematical models are used to solve this problem, which makes it possible to transform the output nonlinear equations into simpler and sometimes even in linear [5]. This makes it possible to simplify the processes of analysis and synthesis of control systems, as well as to apply previously developed design methods. It is advisable to develop such models on the most complex non-linear objects of control, for example, IM [6, 7]. IM is the most common type of electric motors. Its application is most widely used in the control systems of elevators, industrial machines, machine tools, cranes, escalators, locomotives, etc. IM differs from other types of engines with ease of maintenance, low cost, high reliability, the ability to work in aggressive environments [6, 7]. IM, due to their complex dynamics, was originally intended for unregulated control. The development of electric power transformer and computer technology has created the prerequisites for the development of IM control systems, which potentially will not be yield to DC motors in terms of quality control. The behavior of IM is by nature very nonlinear [8], therefore, in order to ensure a high ratio of productivity and cost, it is necessary to develop advanced control methods [9]. New principles of control of IM, as an executive body, consider electromagnetic processes not in the traditional coordinate system, but in that which is associated with any physical

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

vector. Therefore, the principle of control is called “vector control” [10]. This control method allows using IM to obtain the same quality indices as DC motors.

Achieved accuracy and dynamic characteristics of modern IM are provided due to complex nonlinear control algorithms, which complicates the control of complex objects. Under complex objects, for example, are understood mechanical systems consisting of solids with unknown mass-inertial characteristics, interconnected by elastic bonds, prone to external unknown effects [11]. Such systems may include antenna control systems for radars, metalworking machines, sighting systems for small arms, mounted on moving objects, etc.

The development of complex object control systems is complicated by the interaction of two complex dynamic processes occurring in an object with VC and in a technological object. This complexity, first of all, is due to numerous nonlinearities in the mathematical model of the control object on the basis of VC. Therefore, the issue of developing simplified models of nonlinear objects, in particular IM, is an actual issue.

The object of study is the process of vector control of an object with complex nonlinear interconnections of parameters and characteristics.

The subject of study is a model of a non-linear object with vector control.

The purpose of the work is to develop a linear dynamic model of a non-linear object with vector control, which reproduces its dynamics with an accuracy sufficient for practice.

1 PROBLEM STATEMENT

Generalized HACS is a complex set of structural non-linear elements: EMD, CD, ACS, ED, CO. HACS is intended to bring the working body of TS into motion and control this movement according to the prescribed law. Improving the quality and production of technological equipment is associated with the prevailing development and improvement of HACS and its controlnsystem [12]. At the same time, the properties of HACS (Fig. 1) are determined by the interrelated characteristics of the elements that form its subsystems (mechanical, electrical and magnetic) [13].

PSS includes the following derivative elements: power source, regulating and matching devices, rechargeable batteries or other alternative sources. The choice of S is carried out depending on the purpose of HACS in general, solved tasks in the technological process of automated production, the feasibility study of the choice of the S type at the stage of the technical proposal during designig of HACS.

CD serves for converting electric current and voltage: alternating current into a constant, direct current into alternating; alternating current of one frequency in alternating current of another frequency; low constant voltage to high constant voltage.

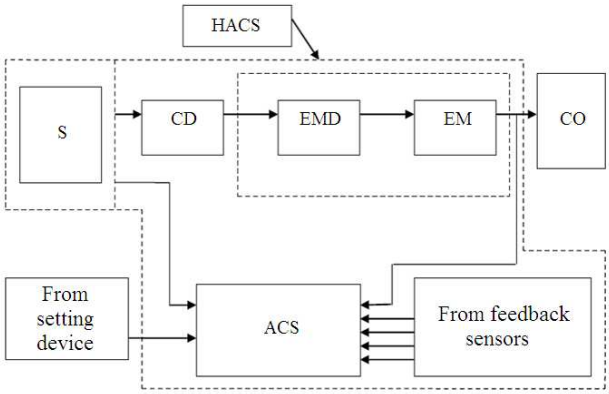


Figure 1 – Generalized functional scheme of HACS construction

EMD serves to convert electrical energy into mechanical to influence the CO. In other words, the EMD must develop a driving force: a driving moment or a mechanical effort transmitted to the S, that is, to perform the functions of the ED for the movement of the working body in accordance with the prescribed law of control.

Under OC it is necessary to understand the unit of technological equipment, as a result of which the shape of the initial workpiece changes, its position or physical properties. In the automated production, complex technological complexes are used to provide processing of the workpiece, dimensional control, transportation and storage of the product. This can involve various machines, automatic tool changers and products, automatic drives and specialized manipulation systems (including industrial robots). Each OC, in its turn, is a constructive module that provides the possibility of a necessary coordinate movement (for example, a cutting tool) with respect to the product being manufactured in ES of OC. Under ES of OC means a set of all nodes and mechanisms that make up the casing of the fixed part (carrier system) and EM drives. Executive mechanisms directly provide relative movements of working bodies, and their dynamic properties significantly affect the output characteristics of the HACS.

The generalized structure of HACS (Fig. 1) is the basis for developing a linear dynamic model of an object with vector control. In this case, it is necessary to take into account the limitations imposed by EM and OC parameters on the operation of HACS and energy and technology parameters of OC.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

In [14, 15], the general theoretical solution of VC algorithm synthesis by the moment and the flux parameter of IM is presented with an indirect orientation along the vector of the stator flux parameter of the stator, which guarantees global asymptotic testing of the moment parameter and the flux parameter of the stator IM. The control obtained on the basis of the principle of passivity is open with respect to the coordinates of the magnetic subsystem of the object determines its high sensitivity to parametric perturbations.

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

In [16,17], a criterion was proposed for maximizing the ratio of control parameters of current and moment of IM based on a mathematical model of the control object, which takes into account the nonlinearity properties of IM. Using of this criterion in vector control algorithms made it possible to ensure asymptotic testing of specified trajectories of current parameter changes with maximization of the ratio of current and moment parameters, regardless of the location of the operating point of the function, which reflects the nonlinearity of IM parameters.

The well-known algorithm of indirect vector control with orientation on the rotor flux linkage vector [18–19] is based on the standard mathematical model of IM. This algorithm provides an asymptotic orientation along the vector of the rotor flux linkage parameter, and also guarantees the asymptotic refinement of a given trajectory of the torque parameter of the control object. For the operation of the algorithm, the necessary condition is to measure the output variables of IM, namely the parameters of the stator currents and the angular velocity of the rotor.

The well-known algorithm vector control of IM moment based on the concept of dynamic linearization of feedback on the measured output in the conditions of direct (based on observers) field orientation [20–24]. This algorithm provides asymptotic testing of specified trajectories of IM moment parameter while maximizing the relationship between the torque parameters and IM current, improves efficiency and reduces losses in the control object.

There is an algorithm for frequency control of the torque parameter of the control object of IM [25–27]. The control quality indicators of this algorithm are somewhat worse than in the previous two [25–27]. A sufficient number of ways to implement vector control algorithms are very complex and in most cases tend to mismatch the vector of the resulting parameters of the control object. Therefore, there is a need to simplify complex non-linear vector control systems and apply linear dynamic models of a non-linear object with vector control for them. Currently, for a complex vector control system, there are no sufficiently accurate equivalent simple models. Development of reliable simple dynamic models will allow to design a vector control system with maximum use of linear methods of synthesis and analysis.

3 MATERIALS AND METHODS

The basis is a generalized functional scheme of vector control, which is shown in Fig. 2.

Simplification of the scheme occurs due to the following blocks:

«Optimizer» is a shaper of optimal program parameters, minimizes the resulting parameter of the economy of the control object. The regulator is also built on the combined principle and consists of an observer of uncertainty and the laws of the formation of the transient characteristics of the parameters of the control object.

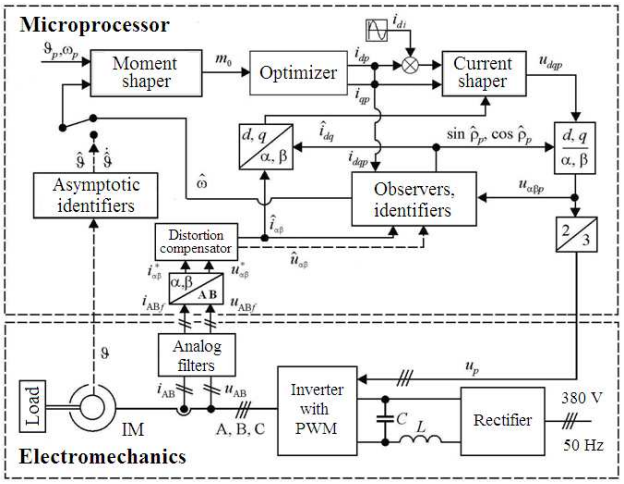


Figure 2 – Functional scheme of the object with vector control

"Observers, identifiers" is the most complex and computationally voluminous block of the control system. In this block variables are calculated, which largely determine the properties and quality indicators of the control system.

The equations of motion of the rotor and the formation of the parameter of the electromagnetic moment m [11] are considered.

$$I\ddot{\vartheta} = m + m_l + m_f, \quad (1)$$

$$m = n\frac{L_m}{L_r}\psi_d i_q, \quad (2)$$

$$T_r\dot{\psi}_d + \psi_d = L_m i_d. \quad (3)$$

In equation (1), m, m_f, m_l and $I\ddot{\vartheta}$ are non-linear (in the case when I is an unknown and variable reduced parameter of the inertia moment).

From the expression (2) it can be seen that the same parameter of the electromagnetic moment can be created with a multitude of combinations ψ_d and i_q that can cause the appearance of different values of the energy efficiency parameter. Among these combinations is the combination with the minimum value that should be used. In the well-known VC of IM schemes, automatic minimization of the energy efficiency parameter is not carried out, but constant adjustment is made to the most probable load parameter.

As can be seen from expressions (2) and (3), the accuracy of the calculation m depends on the accuracy of knowledge of L_m, L_r and T_r. Since the inaccurately calculated value m is fed to the input of the torque parameter controller, the program parameter of the current i_{qp}, and, consequently, the parameter of the electromagnetic moment are formed with an error.

Note. PI-controller, that used in known systems, is able to compensate for only the constant components of the disturbances m_f, m_l included in equations (1). PI-controller is completely unable to compensate for errors in control,

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

which arise due to inaccuracies in the knowledge of the inertia moment parameter, and variable disturbances. Moreover, in case of positional control with PI-controller, the deviation of the inertia moment parameter from its calculated value can lead to instability of motion.

It should be noted that, in the general case, all the parameters and effects on the rotor control object which entering into equations (1)–(3) are unknown. Below it is shown how, under the conditions of the specified uncertainty, it is possible to ensure high accuracy, preset indicators of the quality of transient processes and a minimum of the energy efficiency parameter.

According to [11], to compensate for the influence of uncertainties, it is assumed that m_l, m_f, T_r are unknown, and the parameters of the system are not precisely known, and

$$\begin{aligned} &I = I_0 + I_\delta, m = m_0 + m_\delta, \\ &L_m = L_{m0} + L_{m\delta}, L_r = L_{r0} + L_{r\delta}. \end{aligned} \tag{4}$$

For L_{m0}, L_{r0}, the values of the inductance parameter on the linear part of the nonlinear function are taken as nominal values. According to (2), (3) can be written

$$m = nL_m L_r^{-1}\left(L_m i_d - T_r \dot{\psi}_d\right) i_q. \tag{5}$$

A serious problem standing in the way of system optimization in dynamic modes is the large unknown time constant T_r in (3) and (5). For the purpose of compensation, as well as compensation for the influence of uncertainties, the nominal electromagnetic moment is taken as a parameter

$$m_0 = nL_{m0}^2 L_{r0}^{-1} i_d i_q. \tag{6}$$

In this case, taking into account (4)–(6), equation (1) can be given the form

$$I_0 \ddot{\vartheta} = m_0 + f_m, \tag{7}$$

where the uncertainty is

$$f_m = m_\delta + m_l + m_f - I_\delta \ddot{\vartheta} + f_1\left(L_{m\delta}, L_{r\delta}, T_r \dot{\psi}_d, i_d, i_q\right). \tag{8}$$

Equation (7) is an equation of a fully deterministic object with nominal parameters, subject to the total uncertainty f_m. The task of ensuring the robustness and accuracy of the equation is to estimate the uncertainty of f_m and its compensation at the expense of a special addend in the control law. Uncertainty estimated by observer

$$\dot{z} = -k(z + m_0 + kI_0 \dot{\vartheta}), \ \hat{f}_m = z + kI_0 \dot{\vartheta}. \tag{9}$$

To compensate for the effect of uncertainty, a combined control law is specified in

$$m_0 = m_{00} - \hat{f}_m. \tag{10}$$

Substitution (10) in (7) gives

$$I_0 \ddot{\vartheta} = m_{00} + f_m - \hat{f}_m. \tag{11}$$

With a sufficiently accurate estimate $\hat{f}$ of the uncertainty f, instead of equation (11), we can assume

$$I_0 \ddot{\vartheta} = m_{00}. \tag{12}$$

The law of positional control is given in the form

$$m_{00} = -k_0(\vartheta - \vartheta_p) - k_1(\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_p) + I_0 \ddot{\vartheta}_p. \tag{13}$$

When controlling only speed, the following control law is adopted:

$$m_{00} = -k_0(\omega - \omega_p) - k_1 \int (\omega - \omega_p) dt + I_0 \dot{\omega}_p, \tag{14}$$

where $\omega = \dot{\vartheta}$ and $\omega_p = \dot{\vartheta}_p$.

The integral part in the regulator (14) is intended only for the formation of a given type of transient characteristic. Astatism of the system is provided by the compensating part $\hat{f}_m$ in the control law (10)

When working with the limiting parameter of the stator current of the control object, a simplified control law is recommended to avoid overshooting.

$$m_{00} = -k_0(\omega - \omega_p) + I_0 \dot{\omega}_p. \tag{14′}$$

By determining the coefficients k_o, k_1, you can set the necessary indicators of the transients quality.

From (6)–(8), (10), (12) it follows that the electromagnetic moment parameter is robust to all parameters included in (8), as well as to a change in the parameter of the rotor flux module. With an accurate assessment of variables and accurate formation of stator currents in accordance with their program values ($i_d = i_{dp}$, $i_q = i_{qp}$) and in case of failure to achieve current and voltage parameters and their limitations, the system will behave as linear with given transient quality indicators regardless of disturbances and spread of electric drive parameters.

By minimizing the energy efficiency parameter, the following expressions were found for the optimal (program) parameter values of the components of the stator current vector [9, 10]:

$$\begin{aligned} i_{d\,p} &= \sqrt[4]{\frac{R_s + R_r L_{mr}^2}{R_s}} \sqrt{\frac{|m_0|}{nL_{m0}}}, \\ i_{q\,p} &= \sqrt[4]{\frac{R_s}{R_s + R_r L_{mr}^2}} \sqrt{\frac{|m_0|}{nL_{m0}}} \operatorname{sign} m_0, \end{aligned} \tag{15}$$

The parameters R_s i R_r, which are in (15), due to the temperature change can vary in wide limits. At the time when the time comes for changes in temperature and static resistance, proportions must be taken into account. Therefore, instead of the expression (15) you can imagine

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

$$i_{d\,p} = \sqrt[4]{\frac{R_{s0} + R_{r0}L_{mr}^2}{R_{s0}}}\sqrt{\frac{|m_0|}{nL_{m0}}},$$
$$i_{q\,p} = \sqrt[4]{\frac{R_{s0}}{R_{s0} + R_{r0}L_{mr}^2}}\sqrt{\frac{|m_0|}{nL_{m0}}}\operatorname{sign} m_0. \quad (16)$$

The optimality of the program values of the stator currents parameters is preserved with all the variations of other parameters. At the same time, the ratio between program currents is remarkable in simplicity:

$$\frac{i_{d\,p}}{i_{q\,p}} = \sqrt{1 + L_{mr}^2\frac{R_{r0}}{R_{s0}}}\ \operatorname{sign} m_0\,, \quad (17)$$

from which it follows $\left|i_{d\,p}i_{q\,p}^{-1}\right| = \text{const}$. The value of the program parameter of the magnetizing current $i_{d\,p}$ is determined by the first expression in (24). Then the program parameter of the torque current i_{qp} from the relation (6) is determined by the expression

$$i_{q\,p} = \frac{m_0 L_{r0}}{nL_{m0}^2\, i_{d\,p}}. \quad (18)$$

Expressions (16), (18) are generally non-linear. For linearization, one has to optimize the energy efficiency parameter for one most typical case m_0 (this is done in all known vector control systems). In this case $i_{d\,p}$ will be constant, and $i_{d\,p}$ according to (18) it will have only one variable m_0, on which it will depend linearly.

Fig. 3 shows a block diagram of an electromagnetic torque parameter controller and a shaper for program parameters of stator currents using a combined torque parameter controller.

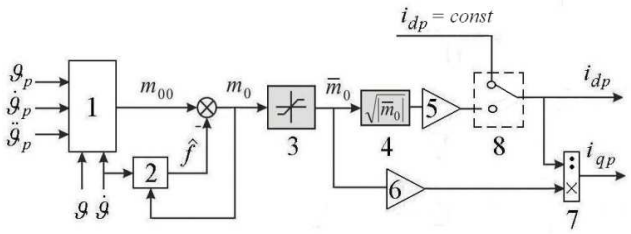


Figure 3 – The block diagram of the parameter regulator of the electromagnetic moment and the program parameters shaper of the stator currents:
1 – block forming the type of transient response m_{00} (14), 2 – block forming the uncertainty observer $\hat{f}_m$ (9), 3 – block limiting the value of the parameter of the electromagnetic moment m_0, 4- block extracting the square root, 5 – block forming the optimal program parameter of the magnetizing current (16), 6 – block forming of the numerator of expression (25), 7 – block forming of the program parameter of the torque current (18), 8 – block of switching according to the optimal parameter of magnetization to a predetermined program parameter of magnetization

The upper key position is intended for operation in modes with fast and frequent changes in the rotor speed (with the key in the upper position, the program current is set constant). Blocks 1–2 serve to provide robustness, and blocks 3–7 are designed to minimize the energy efficiency parameter. Blok 8 switches the modes described above. Since the block 7 is non-linear when $i_{d\,p}$ is changed, to eliminate non-linearity, we will consider the case when $i_{d\,p}$ = const.

One of the main components of the described system and all known systems VC of IM is the chain of formation of program voltage parameters. The study of VC IM showed that in the dynamics of the system can distinguish slow and fast processes. Slow processes take place in control loops for speed, flow coupling, parameter identification, and engine speed estimation. Loops of control current parameters have fast dynamics . This gives grounds to investigate the contours of the currents, regardless of slow processes. A lot of works have been devoted to the design of current circuit regulators in IM. Currently, PI-regulators installed in parts of both contours of the current parameter vector (torque current and magnetization current) described by the equations in the synchronous basis related to the rotor flux coupling parameter are most widely used as current parameter regulators.

In closed current circuits with PI-controllers, it is necessary to find a compromise between speed response, accuracy on the one hand, and overshoot on the other, with the result that the speed of current circuits is limited. Uncertainties of the control object significantly degrade the dynamic characteristics of current circuits with PI controllers. In addition, non-linear cross-links exist between the current circuits. In systems with PI-regulators, to eliminate the effect of cross-links, it is necessary to introduce compensating non-linear cross-links that impede the control algorithm. In [10], a new principle of current loop control was proposed and investigated, which is used by CCC, which provide independent optimization of speed and accuracy on the one hand, and overshoot on the other hand, in conditions of uncertainty parameters of control objects in the presence of uncertain crosslinks.

The control objects in a synchronous basis with a sufficient degree of accuracy for this task can be described by an amplifying link with an unknown gain koeficient k_1. The effect of unknown causes of changes in voltage parameters, the voltage drop across the transistors of FC, the delay in their opening and closing, as well as the effect of “dead” time can be taken into account by the deviation of k_1 from its nominal value. As shown in [10], analog filters with compensators will well eliminate noise caused by PWM and do not distort the phases and amplitudes of the main harmonics. This means that when considering processes in a synchronous basis, the influence of filters will manifest itself only in the form of noise suppression. The operation of the control object in

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

the synchronous basis is described by the following nonlinear system of equations [11]:

$$T_r p\psi_d = -\psi_d + L_m i_d, \quad (19)$$

$$\sigma L_s p\, i_{dq} = -R_s i_{dq} - \omega_0 \sigma L_s J i_{dq} - e_{dq} + u, \quad (20)$$

$$e = \omega_0 L_{mr} J\psi + L_{mr} p\psi, \quad (21)$$

$$u = k_1 u_{dq\,p}, \quad (22)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r},\ \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r},\ L_{mr} = \frac{L_m}{L_r},\ T_s' = \sigma \frac{L_s}{R_s},$$

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_d \\ 0 \end{bmatrix},\ i = i_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix},\ u = u_{dq} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$e = e_{dq} = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Since $T_r >> T_s'$, then in (20), (21) we can assume $\psi = \text{const}$. Each matrix equation (19)–(22) corresponds to two scalar equations. Due to the skew-symmetric matrix J between these equations, there are cross-links that degrade the dynamics and complicate the synthesis of the control system. The resistances R_s and R_r, and, consequently, T_s' and T_r as a result of a change in the temperature parameter of the control object can significantly change and assume unknown values, significantly influencing the dynamics of the contours. The components in equations (20), (21), proportional to J, make these equations nonlinear. System (19)–(22) does not take into account the influence of nonlinear blocks 2 and 8 for two reasons: 1) these blocks are described by algebraic equations, which do not give a delay for sufficiently small counting cycles, 2) possible inaccuracies of calculations in these blocks will be part of uncertainties and compensated with them.

4 EXPERIMENTS

In [11], a robust per-channel decomposed control system was synthesized, which has a large response rate compared to the system with PI-controllers in the absence of overshoot.

Let be R_{s0}, k_{10}, L_{s0} – nominal values of the corresponding parameters, and

$$R_s - R_{s0} = R_{s\delta},\ k_1 - k_{10} = k_{1\delta},\ L_s - L_{s0} = L_{s\delta}. \quad (24)$$

Following the works [8, 11], system (19)–(23) is represented as a nominal model, on which the uncertainty vector f_i acts, namely,

$$pi = -\frac{1}{T_{s0}'} i + k_0 (u_p + f_i), \quad (25)$$

$$k_0 = k_{10} (\sigma L_{s0})^{-1}, \quad (26)$$

$$f_i = k_{10}^{-1} (k_{1\delta} u_p - e - \omega_0 \sigma L_s J i - R_{s\delta} i - pi L_{s\delta}). \quad (27)$$

All coefficients and variables in (25), (26) with the exception of pi and f_i are considered known.

The task is to clean the signal i from the ripples remaining after filtering due to PWM, estimate f_i and compensate it in the controller. The scalar equations corresponding to the vector equation (25) are interconnected through f_i. When compensating, the equations will be solved and the uncertainties will not affect the dynamics of the contours. An independent control is built for each current loop. Therefore, in the following, we will consider scalar equations for the parameters of the magnetization current and the moment current, which coincide in form with (25), namely,

$$pi = -(T_{s0}')^{-1} i + k_0 (u_p + f_i) \quad (28)$$

with measurement

$$y = i. \quad (29)$$

The observer for evaluating i and f_i is

$$p\hat{i} = -(T_{s0}')^{-1} \hat{i} + k_0 (u_p + \hat{f}_i) + l_1 (\hat{i} - i), \quad (30)$$

$$p\hat{f}_i = l_2 (\hat{i} - i). \quad (31)$$

System (30), (31) is linear with constant coefficients, the speed of which can be set by any.

The combined current loop controller will be presented in the form

$$u_p = k_0^{-1} pi_p + (k_0 T_{s0}')^{-1} i_p - (q_1 + q_2 p^{-1})(\hat{i} - i_p) - \hat{f}_i. \quad (32)$$

Note. The integral part in the regulator (32) is intended only for the formation of the desired type of transient response. The astatism of the system is provided by the compensating part f_i.

Substituting (32) into (28) with regard to the relations

$$\hat{i} = i + \tilde{i},\ \hat{f}_i = f_i + \tilde{f}_i, \quad (33)$$

gives the dynamics equations of the controlled current loop

$$p(i - i_p) = -(T_{s0}')^{-1} (i - i_p) - k_0 \left[(q_1 + q_2 p^{-1})(i - i_p + \tilde{i}) - \tilde{f}_i \right]. \quad (34)$$

With the right choice of observer parameters, the variables $\tilde{i}$, $\tilde{f}_i$ tend to zero over time. In this case, the equation of dynamics and current regulators take the form

$$p(i - i_p) = -\left[(T_{s0}')^{-1} + k_0 (q_1 + q_2 p^{-1}) \right] (i - i_p), \quad (35)$$

$$u_p = k_0^{-1} pi_p + (k_0 T_{s0}')^{-1} i_p - (q_1 + q_2 p^{-1})(i - i_p). \quad (36)$$

Under the simplified control law and the exact work of the observer, analogous equations will have the form

$$pi = -\left[(T_{s0}')^{-1} + k_0 q_1 \right] (i - i_p), \quad (37)$$

$$u_p = (k_0 T_{s0}')^{-1} i_p - q_1 (i - i_p). \quad (38)$$

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

In the full system, taking into account the dynamics of the observer and the controller, equations (35), (37) are used to select controller parameters. In the developed linear system, these equations will describe the operation of the current loop. The transfer function of the complete system (35) is equal to one, the simplified system is

$$W(p)=\frac{i}{i_p}=\frac{(T'_{s0})^{-1}+k_0q_1}{p+\left[(T'_{s0})^{-1}+k_0q_1\right]}. \quad (39)$$

Attention should be paid to the fact that the operation of the current circuits does not depend on the imperfections included in the uncertainty vector (27), namely:

1) a sharp change in the voltage parameters of the supply network;

2) all errors of the frequency converter (resistances of keys, delays in their opening and closing, dead time);

3) cross-connections between the parameters of the torque and magnetizing current contours;

4) changes in parameters (including temperature) resistances of the circuits

5) changes in the parameters of the circuits inductances, due to the non-linearity of the control object.

As shown by the numerical simulation of a complete non-linear model of current loop control systems as part of VC, taking into account the worst combination of uncertainties [8], models (35) and (37) reproduce the control process in both loops with high accuracy, ensuring the time of the transition process current parameters i_{dp}, i_{qp}, which does not exceed 0.001–0.003 s. (Transition time can be set and guaranteed in advance).

From the expression (6) follows: the nominal parameter of the electromagnetic moment m_0 is proportional to the product $i_d i_q$. To eliminate this non-linearity, it is customary to fix the values of the magnetizing current parameter by setting i_{dp} = const, as a result of which the torque program parameter of the current is determined by expression (18). Based on the above, $i_d = i_{dp}$ = const will be relied upon. In a simplified system, which provides for the ideal work of observers of uncertainties and their compensation, equation (35), (37) describe the operation of a closed loop of current.

With positional control, the displacement, by which the velocity can be calculated, is measured or calculated on a mandatory basis. In this case, the same method can be used to estimate the speed, both in the original nonlinear and in the equivalent linear system. The problem occurs when controlling speed in the absence of information about speed and movement. In the monograph [11], several methods for estimating velocities are considered.

Unfortunately, among the known methods, no methods were found that could be used in the developed equivalent linear system. Therefore, in a linear system, the velocity will be considered known. In this regard, there is no need to estimate the parameters of the stator and rotor resistances. Therefore, the following are methods for estimating velocities and resistances used in the original nonlinear system.

In a complete (non-linear) system, the synchronous speed parameter is estimated from the dependence [11]

$$\hat{\omega}_o=\frac{\hat{\psi}_\alpha e_\beta-\hat{\psi}_\beta e_\alpha}{\hat{\psi}_\alpha^2+\hat{\psi}_\beta^2}. \quad (40)$$

The estimation of the flux linkage parameter is performed with the help of an observer recorded in a vector form in a winding basis [11]

$$p\hat{\psi}=e_0+\hat{e}_\delta+l_1\left(\hat{\psi}-\psi^*\right), \quad (41)$$

$$p\hat{e}_\delta=l_2\left(\hat{\psi}-\psi^*\right). \quad (42)$$

The rotor speed parameter is determined by the expression

$$\omega=\frac{\omega_0-\omega_{sl}}{n}, \quad (43)$$

$$\omega_{sl}=\frac{i_q}{T_r i_{d\,p}}=\frac{R_r i_q}{L_r i_{d\,p}}. \quad (44)$$

The stator resistance parameter is estimated using an observer with a transfer coefficient l_s [8]

$$\dot{z}_s=l_s\left[\left|i_{dq\,p}\right|^2\left(z_s+l_s\frac{1}{2}\sigma L_s\left|i_{dq\,p}\right|^2\right)-i_{dq\,p}^T u_{dq}+R_{s0}\left|i_{dq\,p}\right|^2+\omega_0\frac{m_0}{n}\right], \quad (45)$$

$$\hat{R}_{s\delta}=z_s+l_s\frac{1}{2}\sigma L_s\left|i_{dq\,p}\right|^2, \quad (46)$$

$$R_s=R_{s0}+\hat{R}_{s\delta}. \quad (47)$$

To estimate the rotor resistance parameter, we will use its connection with the stator resistance parameter, due to the interrelation of the rotor and stator temperature parameters, as indicated in [8].

$$\hat{R}_r=R_{r0}\left(\hat{R}_s R_{s0}^{-1}\right). \quad (49)$$

In the proposed VC system, the present parameter of rotor resistance is included only in expression (45). Estimation of the temperature of the stator T_{ts} and the rotor T_{tr} can be done by dependencies

$$\hat{T}_{ts}=T_0+\left(\hat{R}_s R_{s0}^{-1}-1\right)\alpha^{-1},\ \ \hat{T}_{tr}=\hat{T}_{ts}. \quad (50)$$

Fig. 4 shows a block diagram of a linearized system of VC IM , which consists of the circuit of the torque current and the dynamics of the mechanical part of the system.

Block 3 (Fig. 4) takes into account the limitations of the current parameter in the original system. The element in the feedback takes into account the possible time lag that occurs when estimating the speed in the original nonlinear system. The transfer function of the inertial link in a straight chain is equal to the function in (39). As can be seen in the figure 4, the block diagram of the linearized system VC IM is simpler than the block diagram of a DC motor of independent excitation (there is no EMF circuit).

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

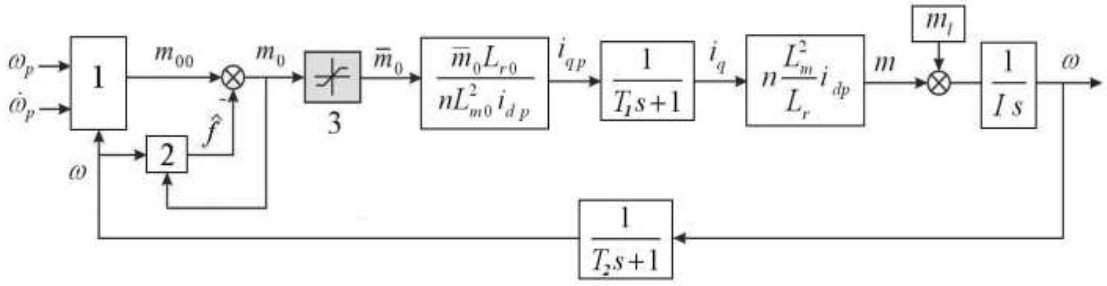


Figure 4 – Block diagram of the linearized system VC AD:
1 – block forming the type of transition characteristics m_{00} (14), 2 – block forming of uncertainty observer $\hat{f}_m$ (9), 3 – limiting block of electromagnetic moment parameter value m_0,

The linearization of the original nonlinear indefinite system was carried out by applying robust control methods that compensate for uncertainties. Therefore, all the parameters of the scheme, except for the given moment of rotor inertia and the load, are reliably known and are set in advance.

A simulation of a complete non-linear system of equations was carried out, which corresponds to Fig. 2, and the linear system of equations, corresponds to Fig. 4 using the graphic extension package MATLAB for system SimuLink. At achievement of steady speeds the load was put and removed. At positive speeds, IM worked in the motor mode, and at negative speeds – in the generator mode.

5 RESULTS

In Fig. 5–11, the processes obtained by simulating a complete non-linear system of equations (index *n*) and a linear system of equations (index *l*) are compared. As seen in Fig. 5 and Fig. 6, in all modes of operation: acceleration, stabilization of speed under load in the motor and generator modes and without load, reverse and stabilization of zero speed, the vector control system provides good tracking of a given trajectory. Fig. 7 shows the change in the parameters of the magnetizing and moment currents during the operation cyclogram corresponding to Fig. 5. Fig. 8 illustrates the zero-speed stabilization process with no load and under load from 0.25 s. to 3 seconds. At the time point of 1.25 s, the voltage dropped by 30%, and by 2 s. tension recovered. In Fig. 9 shows a fragment of the process shown in Fig. 8.

As follows from Fig. 5–9, overload, load shedding, failure and recovery of voltage only briefly violate the stabilization of a given speed. The system is astatic with respect to the specified actions. All of the above applies to the original nonlinear system. The linear model, operating independently, reproduces with high accuracy the change in both currents and speeds at all points in time, except for moments of voltage sudden change.

The above confirms the ability to develop algorithms for vector management of IM with a nonlinear model, working with a linear model. Herewith you can use well-designed simple linear methods. Modeling processes using a linear model requires an order of magnitude less time than modeling a complete model. To predict the behavior of the nonlinear system when the reduced moment of rotor inertia changes in Fig. 10 and 11, 3 simultaneously simulated processes are shown: with nominal moment of inertia (curves with index 1), 2 times larger (curves with index 2) and 2 times smaller (curves with index 3). The simulation results of the linear system indicate the robustness of the nonlinear system with respect to the change in the reduced moment of IM rotor inertia.

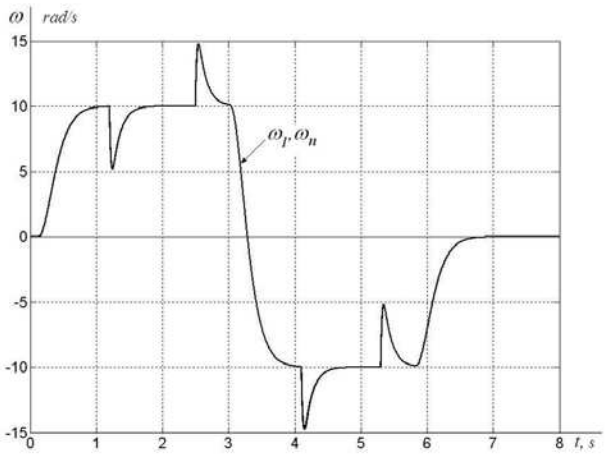


Figure 5 – Engine Speed

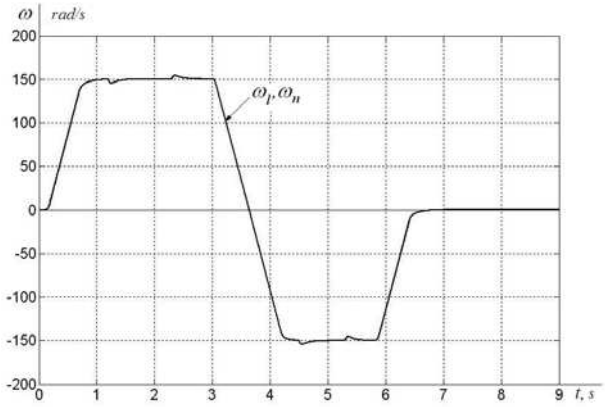


Figure 6 – Engine speed at acceleration up to 150 rad/s

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

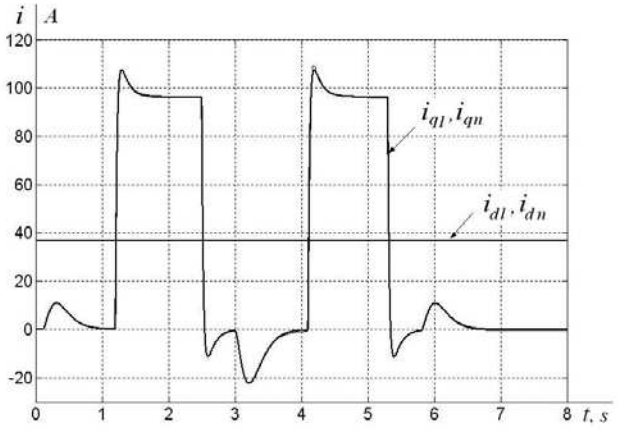


Figure 7 – Magnetizing and torque currents

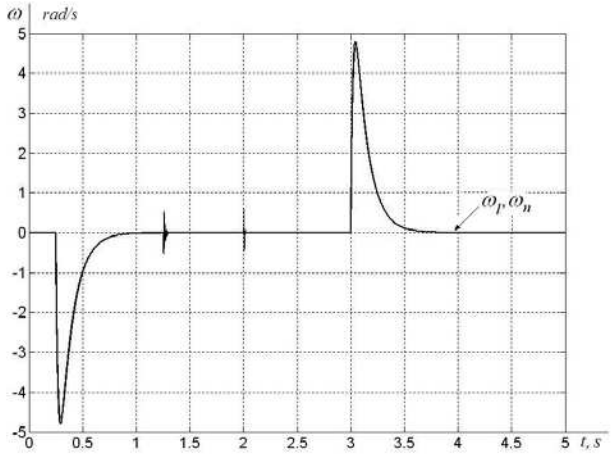


Figure 8 – Zero speed stabilization

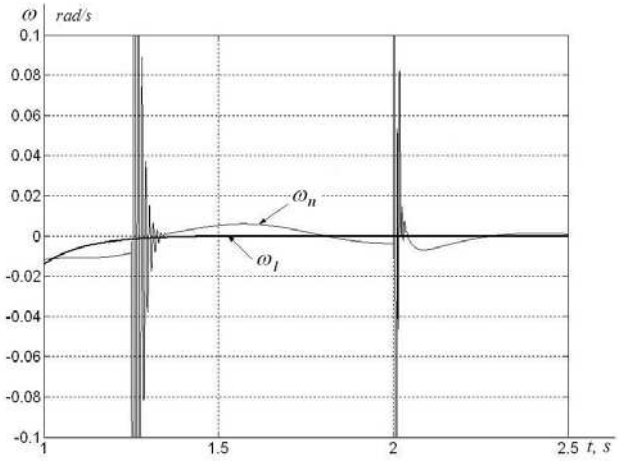


Figure 9 – System reaction at the voltage drop at zero-velocity stabilization

6 DISCUSSION

For the system of VC AD with a non-linear mathematical model, a simple equivalent mathematical model is compiled that describes the operation of the initial system in all operating modes quite accurately. The equivalent system preserves the robustness of the original system with respect to the inaccuracy of knowing the parameters of the reduced

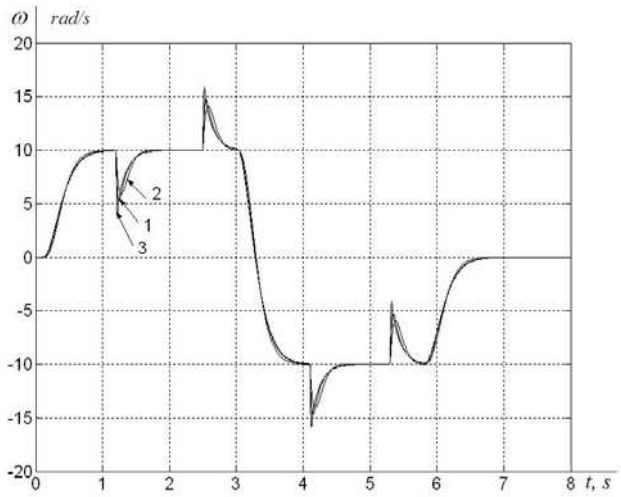


Figure 10 – Motor speed at various moments of inertia

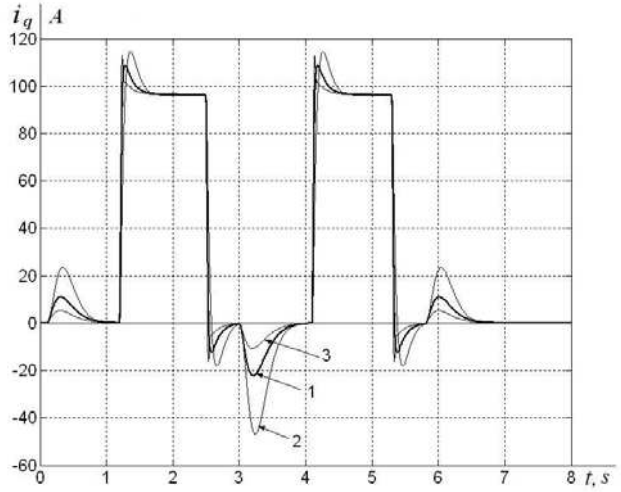


Figure 11 – Magnetizing motor currents at different moments of inertia

moment of rotor inertia, load, friction, resistance of the stator and rotor, inaccuracy formation of the electromagnetic moment, voltage spikes, all errors of the frequency converter (resistances of keys, delays of their opening and closing, dead time, nonlinearity of the equivalent characteristic), cross-links between the torque and magnetizing circuits of the current.

The simplicity and linearity of the equivalent system allows us to synthesize the control laws of the original nonlinear system by well-developed linear methods with significantly less time spent on modeling. This is especially important when developing control systems for complex dynamic objects using induction motors. Numerical simulation of the dynamics of the original nonlinear and equivalent linear systems showed a good agreement between transient and stationary processes. Developed linear control methods with small modifications can be applied to control using DC motors and synchronous motors.

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

CONCLUSIONS

1. The scientific novelty of obtained results:

– for the robust system under study of vector control of an object with a substantial non-linearity of properties and characteristics, simple equivalent models were compiled that fairly accurately reproduce the operation of the original system in all modes of operation. Simplification of models is achieved by considering the dynamics of the entire system in a synchronous basis, robust methods of controlling the parameters of currents and by neglecting really small errors in the work of regulators and observers of current circuit;

– synthesized models, as well as the original nonlinear system, have the property of robustness due to the use of combined control, as the whole drive, and current circuits. Due to this, equivalent systems, as well as the original, retain the robustness property in relation to

– inaccuracies of parameters knowledge of the given moment of rotor inertia, load, friction;

– inaccuracies in the formation of the electromagnetic moment;

– to all errors of the frequency converter (resistances of keys, lateness of their opening and closing, dead time);

– cross-connections between the torque and magnetizing circuits of currents;

– changes (including temperature) resistance contours;

– changes in the inductance of the circuits, due to the magnetization curve;

– power surges.

2. The practical significance of obtained results.

The simplicity and linearity of the equivalent system allows us to synthesize the control laws of the original nonlinear system by well-developed linear methods with significantly less time spent on modeling. The obtained results confirm that the linearized vector-controlled object model can be used to control of IM.

ACKNOWLEDGEMENTS

The studies outlined in the article were carried out on the basis of Zaporizhzhya National Technical University in accordance with the thematic research plan for the state budget theme DB 03517 “Raise the efficiency and reliability of electrical systems transformation of alternating current” (state registration number 0117U003921).

REFERENCES

1. Khalil H.J. Nonlinear systems. N.-J. Prentice Hall, 1996, 750 p.
2. Isidori A. Nonlinear control systems. N.-Y. Springer, 1995, 657 p.
3. Yarymbash D. S., Yarymbash S. T., Kotsur M. I., Litvinov D. O. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method, *Radio Electronics, Computer Science, Control,* 2018, No. 1, pp. 65–74. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-8.
4. Yelkin V.I. O redukcii nelineunyh upravljaemyh system k lineynym, *Avtomatika i telemehanika,* 2000, No. 2, pp. 45– 55.
5. Nikiforov V.O. Adaptivnoe i robastnoe upravlenie s kompencaciey vozmusheniy. SPb.,Nauka, 2003, 282 p.
6. Salleh Z., Sulaiman M., Omar R. Optimization of Fuzzy Logic Based for Vector Control Induction Motor Drives, *IEEE 8th Computer Science and Electronic Engineering (CEEC), UK, 28–30 September 2016: proceedings*, Colchester, IEEE, 2016, pp. 83–86. DOI: 10.1109/CEEC.2016.7835893.
7. Patakor F. A., Salleh Z., Sulaiman M., Jantan N. Auto-tuning Sliding Mode Control for Induction Motor Drives, *IEEE 8th Computer Science and Electronic Engineering (CEEC), UK, 28–30 September 2016: proceedings*. Colchester, IEEE, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/CEEC.2016.7835892.
8. Raumer T. V., Dion J. M., Dugard L. Applied nonlinear control of an induction motor using digital signal processing, *IEEE Trans. Control System Technology*, 1994. Vol. 2, No. 4, pp. 327–335. DOI: https://doi.org/10.1002/acs.4480070511.
9. Kuroe Y., Yoneda Y. Design of a new controller for induction motors based on exact linearization, *Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Japan, 28 October-1 November 1991: proceedings*. Kobe, IECON, 1991, Vol. 1, pp. 621–626. DOI: 10.1109/IECON.1991.239215.
10. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientiening die Grundlage fur die Transvector – Regelung von Asynchronmaschienen. Siemens-Zeitschrift, 1971, 757 p.
11. Potapenko Y. M., Potapenko Y. Y. Robastnye algoritmy vectornogo upravlenija asinhronnym privodom. Zaporizhzhya, ZNTU, 2009, 352 p.
12. Karnauhov N. F. Electromehanicheskie i mehatronnye sistemy. Rostov-na-Donu, Feniks, 2006, 320 p.
13. Karnauhov N. F. Impulsnye preobrazovayeli ispolnitelnyh ustroystv electromehatronnyh sistem, Uchebnoe posobie. Rostov-na-Donu, DGTU, 1994, 71 p.
14. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. New passivity based speed-fluxtracking controllers for induction motor, *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Japan, 22–28 October 2000: proceedings*. Nagoya, IECON, 2000, Vol. 2, pp. 1099–1104. DOI: 10.1109/IECON.2000.972276.
15. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Theoretical and Experimental Comparison of indirect field-oriented Controllers for Induction Motors, *IEEE Transactions On Power Electronics*, 2003, Vol. 18, No. 1, pp. 151–163. DOI: 10.1109/TPEL.2002.807123.
16. Peresada S., Kovbasa S., Dymko S. Indirect Field-Oriented Torque Control of Induction Motors with Maximum Torque per Ampere Ratio, *Transactions of Kremenchuk State University*, 2010, Vol. 2, No. 3, pp. 33 – 36.
17. Wasynchuk O., Sudhoff S. D., Corsine K. A., Tichenor J. et al. A Maximum Torque per Ampere Control Strategy for Induction Motor Drives, *IEEE Transactions on Energy Conversion,* 1998, Vol. 13, No. 2, pp. 163–169. DOI 10.1109/60.678980.
18. Grcar B., Cafuta P., Stumberger G. et al. Non-Holonomy in Induction Machine Torque Control, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, Vol. 19, No. 2, pp. 367–375. DOI: 10.1109/TCST.2010.2042718.
19. Famouri P., Cathey J. J. Loss Minimization Control of an Induction Motor Drive, *IEEE Transactions Industrial Applicaions*, 1991, Vol. 27, pp. 32–37. DOI: 10.1109/28.67529
20. Dymko S., Peresada S., Leidhold R. Torque Control of Saturated Induction Motor with Torque per Ampere Ratio Maximization, *IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, Ukraine, 2–6 June 2014: proceedin*gs. Kiev, IEPS, 2014, pp. 251–256. DOI: 10.1109/IEPS.2014.6874189.
21. Kwon C., Sudhoff S. D. An Improved Maximum Torque per amp Control Strategy for Induction Machine Drives, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, USA, 6–10 March 2005, proceedings*. Austin, APEC, 2005, Vol. 2, pp. 740–745. DOI: 10.1109/APEC.2005.1453052.
22. Marino R., Peresada S., Valigi P. Adaptive input-output linearizing control of induction motors, *IEEE Transactions on Automatic Control,* 1993, Vol. 38, № 2, pp. 208–221. DOI:10.1109/9.250510.
23. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Zhelinskyi N. Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: Theory and experiments, *Tekhnichna Elektrodynamika,* 2017, No. 2017, Issue 2, pp. 48–56.
24. Ambrish D., Madhusudan S., Narendra K. DSP based feedback linearization control of vector controlled induction motor drive, *IEEE International Conferenceon Power Electronics, Intelligent Controland Energy Systems, India 4–6 July 2016, proceedings*. Delhi, ICPEICES, 2016, pp. 36–42. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853631.
25. Sobczuk D. L. Feedback Linearization Control of Inverter Fed Induction Motor-DSP Implementation, *IEEE International*

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

Symposium on Industrial Electronics, Italy, 8–11 July 2002: proceedings. L'Aquila, IEEE, 2002, pp. 678–682. DOI: 10.1109/ISIE.2002.1026373.
26. Sobczuk D., Malinowski M. Feedback linearization control of inverter fed induction motor with sliding mode speed and flux observers, *Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, France, 6–10 November 2006: proceedings.* Paris, IEEE, 2006, Vol. 2, No. 5, pp. 1299–1304. DOI: 10.1109/IECON.2006.348089.
27. Marquez H. J. Nonlinear control systems. New Jersey, John Wiley & Sons, 2003, 376 p.

Received 15.01.2019.
Accepted 26.03.2019.

УДК 681.527.2

ЛІНЕАРІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ З ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ

Куланіна Є. В. – канд. техн. наук, старший викладач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Яримбаш Д. С. – д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Коцур М. І. – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Яримбаш С. Т. – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Достатня кількість способів реалізації алгоритмів векторного керування є дуже складними та у більшості випадків мають схильність до незбіжності вектору результуючих параметрів об'єкту керування. Тому існує потреба у спрощенні складних нелінійних системи векторного керування та застосування для них лінійних динамічних моделей нелінійного об'єкта з векторним керуванням. В даний час для складної системи векторного керування відсутні досить точні еквівалентні прості моделі. Розробка надійних простих динамічних моделей дозволить проектувати векторну систему керування з максимальним використанням лінійних методів синтезу та аналізу.

Мета статті – розробка лінійної динамічної моделі нелінійного об'єкта з векторним керуванням, яка з достатньою для практики точністю відтворює його диніміку.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використано такі методи: метод простору станів для опису роботи систем керування; теорія фільтрації, зокрема, спостерігачів, для оцінки векторів стану, невизначеностей та ідентифікації параметрів; методи модального керування для синтезу спостерігачів і регуляторів; метод чисельного моделювання для ілюстрації працездатності синтезованих систем керування; векторне керування нелінійним обєктом.

Результати. Для досліджуваної робастної системи векторного керування об'єктом з суттєвою нелінійністю властивостей та характеристик складені прості лінійні еквівалентні математичні моделі, що досить точно відтворюють роботу вихідної системи у всіх режимах роботи. Спрощення математичних моделей досягається шляхом розгляду динаміки всієї системи в синхронному базисі, робастних методів керування параметрами, та за рахунок нехтування дійсно малими похибками роботи регуляторів і спостерігачів. Синтезовані моделі, так само, як і вихідна нелінійна система, мають властивість робастності за рахунок застосування комбінованого керування.

Висновки. Простота та лінійність еквівалентної системи дозволяють синтезувати закони керування вихідної нелінійної системи добре розробленими лінійними методами з істотно меншими витратами часу на моделювання. Чисельне моделювання динаміки вихідної нелінійної та еквівалентної лінійної систем показало добрий збіг перехідних і стаціонарних процесів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: модель, лінійність, керування, спостерігач, робастність.

УДК 681.527.2

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Куланина Е. В. – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Ярымбаш Д. С. – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Коцур М. И. – канд. техн. наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Ярымбаш С. Т. – канд. техн. наук, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. При достаточном количестве способов реализации алгоритмов векторного управления, они являются очень сложными, и в большинстве случаев имеют склонность к несходимости вектора результирующих параметров объекта управления. Поэтому существует необходимость в упрощении сложных нелинейных систем векторного управления и применение для них линейных динамических моделей нелинейного объекта с векторным управлением. В настоящее время для сложной системы векторного управления отсутствуют достаточно точные эквивалентные простые модели. Разработка надежных простых динамических моделей позволит проектировать векторную систему управления с максимальным использованием линейных методов синтеза и анализа.

Цель статьи. Разработка линейной динамической модели нелинейного объекта с векторным управлением, которая с достаточной для практики точностью воспроизводит его динимику.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы следующие методы: метод пространства состояний для описания работы систем управления; теория фильтрации, в частности, наблюдателей, для оценки векторов состояния, неопределенностей и идентификации параметров; методы модального управления для синтеза наблюдателей и

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

регуляторов; метод численного моделирования для иллюстрации работоспособности синтезированных систем управления; векторное управление нелинейным объектом.

Результаты. Для исследуемой робастной системы векторного управления объектом с суттювою нелинейностью свойств и характеристик составлены простые линейные эквивалентные математические модели, которые достаточно точно воспроизводят работу исходной системы во всех режимах работы. Упрощение математических моделей достигается путем рассмотрения динамики всей системы в синхронном базисе, робастных методов управления параметрами, и за счет пренебрежения действительно малыми погрешностями работы регуляторов и наблюдателей. Синтезированные модели, так же, как и исходная нелинейная система, имеют свойство робастности за счет применения комбинированного управления.

Выводы. Простота и линейность эквивалентной системы позволяют синтезировать законы управления исходной нелинейной системы хорошо разработанными линейными методами с существенно меньшими затратами времени на моделирование. Численное моделирование динамики исходной нелинейной и эквивалентной линейной систем показало хорошее совпадение переходных и стационарных процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модель, линейность, управление, наблюдатель, робастность.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Khalil H. J. Nonlinear systems / H. J. Khalil. – N.-J. : Prentice Hall, 1996. – 750 p.
2. Isidori A. Nonlinear control systems / A. Isidori. – N.-Y. : Springer, 1995. – 657 p.
3. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method / [D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, M. I. Kotsur, D. O. Litvinov] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – № 1. – P. 65–74. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-8.
4. Елкин В.И. О редукции нелинейных управляемых систем к линейным / В.И. Елкин // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 2. – С. 45–55.
5. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений / В. О. Никифоров. – СПб. : Наука, 2003. – 282 с.
6. Salleh Z. Optimization of Fuzzy Logic Based for Vector Control Induction Motor Drives / Z. Salleh, M. Sulaiman, R. Omar // IEEE 8th Computer Science and Electronic Engineering (CEEC), UK, 28–30 September 2016: proceedings. – Colchester: IEEE, 2016. – P. 83–86. DOI: 10.1109/CEEC.2016.7835893.
7. Auto-tuning Sliding Mode Control for Induction Motor Drives / [F. A. Patakor, Z. Salleh, M. Sulaiman, N. Jantan] // IEEE 8th Computer Science and Electronic Engineering (CEEC), UK, 28–30 September 2016: proceedings. – Colchester: IEEE, 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1109/CEEC.2016.7835892.
8. Raumer T. V. Applied nonlinear control of an induction motor using digital signal processing / T. Von Raumer, J. M. Dion, L. Dugard // IEEE Trans. Control System Technology. – 1994. – Vol. 2, № 4. – P. 327–335. DOI: https://doi.org/10.1002/acs.4480070511.
9. Kuroe Y. Design of a new controller for induction motors based on exact linearization / Y. Kuroe, Y. Yoneda // Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Japan, 28 October-1 November 1991: proceedings. – Kobe: IECON, 1991. – Vol. 1. – P. 621–626. DOI: 10.1109/IECON.1991.239215.
10. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientiening die Grundlage fur die Transvector – Regelung von Asynchronmaschienen / F. Blaschke. – Siemens-Zeitschrift, 1971. – 757 p.
11. Потапенко Е. М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко. – Запорожье : ЗНТУ, 2009. – 352 с.
12. Карнаухов Н. Ф. Электромеханические и мехатронные системы / Н. Ф. Карнаухов. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2006. – 320 с.
13. Карнаухов Н. Ф. Импульсные преобразователи исполнительных устройств электромеханотронных систем: Учеб. пособие / Н. Ф. Карнаухов. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 1994. –71 с.
14. Peresada S. New passivity based speed-fluxtracking controllers for induction motor / S. Peresada, A. Tilli, A. Tonielli // Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Japan, 22–28 October 2000: proceedings. – Nagoya: IECON, 2000. – Vol. 2. – P. 1099–1104. DOI: 10.1109/IECON.2000.972276.
15. Peresada S. Theoretical and Experimental Comparison of indirect field-oriented Controllers for Induction Motors / S. Peresada, A. Tilli, A. Tonielli // IEEE Transactions On Power Electronics. – 2003. – Vol. 18, No. 1. – P. 151–163. DOI: 10.1109/TPEL.2002.807123.
16. Peresada S. Indirect Field-Oriented Torque Control of Induction Motors with Maximum Torque per Ampere Ratio / S. Peresada, S. Kovbasa, S. Dymko // Transactions of Kremenchuk State University. – 2010. – Vol. 2, No. 3. – P. 33 – 36.
17. A Maximum Torque per Ampere Control Strategy for Induction Motor Drives / [O. Wasynchuk, S. D. Sudhoff, K. A. Corsine, J. Tichenor et al.] // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1998. – Vol. 13, No. 2. – P. 163–169. DOI 10.1109/60.678980.
18. Non-Holonomy in Induction Machine Torque Control / [B. Grcar, P. Cafuta, G. Stumberger et al.] // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2011. – Vol. 19, No. 2. – P. 367–375. DOI: 10.1109/TCST.2010.2042718.
19. Famouri P. Loss Minimization Control of an Induction Motor Drive / P. Famouri, J. J. Cathey // IEEE Transactions Industrial Applicaions. – 1991. – Vol. 27. – P. 32–37. DOI: 10.1109/28.67529
20. Dymko S. Torque Control of Saturated Induction Motor with Torque per Ampere Ratio Maximization / S. Dymko, S. Peresada, R. Leidhold // IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, Ukraine, 2–6 June 2014: proceedings. – Kiev: IEPS, 2014. – P. 251–256. DOI: 10.1109/IEPS.2014.6874189.
21. Kwon C. An Improved Maximum Torque per amp Control Strategy for Induction Machine Drives / C. Kwon, S. D. Sudhoff // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, USA, 6–10 March 2005: proceedings. – Austin: APEC, 2005. – Vol. 2. – P. 740–745. DOI: 10.1109/APEC.2005.1453052.
22. Marino R. Adaptive input-output linearizing control of induction motors / R. Marino, S. Peresada, P. Valigi // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1993. – Vol. 38, № 2. – P. 208–221. DOI:10.1109/9.250510.
23. Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: Theory and experiments / [S. Peresada, S. Kovbasa, S. Korol, N. Zhelinskyi] // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2017. – No. 2017, Issue 2. – P. 48–56.
24. Ambrish D. DSP based feedback linearization control of vector controlled induction motor drive / D. Ambrish, S. Madhusudan, K. Narendra // IEEE International Conferenceon Power Electronics, Intelligent Controland Energy Systems, India 4–6 July 2016: proceedings. – Delhi: ICPEICES, 2016. – P. 36–42. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853631.
25. Sobczuk D. L. Feedback Linearization Control of Inverter Fed Induction Motor-DSP Implementation / D. L. Sobczuk // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Italy, 8–11 July 2002: proceedings. – L'Aquila : IEEE, 2002. – P. 678–682. DOI: 10.1109/ISIE.2002.1026373.
26. Sobczuk D. Feedback linearization control of inverter fed induction motor with sliding mode speed and flux observers / D. Sobczuk, M. Malinowski // Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, France, 6–10 November 2006: proceedings. – Paris: IEEE, 2006. – Vol. 2, No 5. – P. 1299–1304. DOI: 10.1109/IECON.2006.348089.
27. Marquez H. J. Nonlinear control systems / H. J. Marquez. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2003. – 376 p.

©Kulanina Y. V., Yarymbash D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-20

UDC 658.5.011.56

UNIFIED BASIC SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR PRECISION ENERGY-SAVING SYSTEMS OF AUTOMATIC REGULATION AND CONTROL

Kaniuk G. I. – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Heat and Power Engineering and Energy Saving Technologies of Ukrainian Engineering and Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine.

Mezeria A. Yu. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Power Engineering and Energy Saving Technologies of Ukrainian Engineering and Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine.

Kniazieva V. N. – Post-graduate student of the Department of Heat and Power Engineering and Energy Saving Technologies of Ukrainian Engineering and Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine.

Khoroshun D. M. – Post-graduate student of the department of heat and Power Engineering and Energy Saving Technologies of Ukrainian Engineering and Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine.

Fursova T. N. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Power Engineering and Energy Saving Technologies of Ukrainian Engineering and Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Methods for the synthesis of precision electro-hydraulic control systems using the principle of multiplication are proposed. Use of the principle of multiplication allows to create compact control systems of technological objects, having high rates of precision and operation speed.

The problem of creating the unified basic software and hardware complex for precision automatic control systems and control of an optional technological object is considered.

On the basis of effective methods of the modern theory of optimal control, control algorithms have been developed that provide maximum compensation for all types of statistical and dynamic control errors.

Objective. The urgency of the work is due to the need to improve the precision of control systems of technological objects and the development of software and hardware complex for these systems.

Method. We have used the methods of optimal control, methods of structural synthesis. To confirm the validity of the developed models and principles, the method of experimental studies based on the operating equipment of test benches was used. To debug an experimental model of a basic software and hardware complex for testing the plain bearings of internal combustion engines, mathematical simulation of an electro-hydraulic drive was used. For the synthesis of a precision controller, the multiplication method was used.

Results. A number of standard sizes of high-speed precision EHSS based on part-turn hydraulic motors with a torque moment of up to 40 kNm were developed, providing reproduction in the tracking mode of specified input effects with a bandwidth of up to 20 Hz, positioning accuracy of up to one angular minute and a control range of up to 10^4. Based on developed EHSS automated simulation dynamic stands were created and brought to practical use for testing mobile object guidance systems (Customer-Central Research Institute of Chemistry and Mechanics, Moscow) and the semi-axes transmission (Customer-JSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny). Based on the results of the research, a basic software and hardware complex for testing equipment of agricultural, automotive and other industries was created. The high-speed precision regulator for controlling the position of steam turbine actuator valves has been synthesized to compensate for all the main types of static and dynamic errors and more than double the performance compared to the base variant while maintaining acceptable stability margins (the results are used in promising projects of the State Energy Company "Centrenergo", National Nuclear Energy Generating Company "Energoatom", as well as in the Institute of Control Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Conclusions. The practical engineering methods for the synthesis of effective control laws of precision electro-hydraulic systems are proposed, as well as a number of effective regulators providing high characteristics of precision and operation speed. The principle of multiplicative control is proposed which allows to synthesize effective control algorithms for individual, autonomous, fully controlled and observable electro-hydraulic servo drive circuits based on third-order mathematical models. For selected autonomous control loops, effective control laws are obtained based on modal control methods and solving inverse problems of dynamics.

The proposed synthesis techniques are considered using the harmonic linearization method, the real nonlinear characteristics of the control signal power limitation, which allows determining the real rational ratios of the regulator parameters and real limiting precision and speed indicators, as well as preventing unwanted auto-oscillatory modes in the systems. In order to reduce the number of measured parameters used in the formation of the proposed control laws, on the basis of the well-known general principles of the synthesis of observing identification devices, the universal structures and formulas for calculating the parameters of standard models of autonomous control circuits of the EHSS were obtained. The method of autonomous testing and debugging of the EHSS control system using the electronic simulator of electro-hydraulic actuator has been improved which makes it possible to significantly reduce the time and cost involved in creating and engineering development a complex system.

KEYWORDS: unification, electro-hydraulic drives, automatic control systems, precision, operation speed, control algorithms.

ABBREVIATIONS

BSHC is a basic software and hardware complex;
EHD is a electro-hydraulic drive;
ECM is a electronic computing machine (a computer);
EHSS is a electro-hydraulic servo system;
RW is a research work;
EHA is a electro-hydraulic actuator.

© Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu, Kniazieva V. N., Khoroshun D. M., Fursova T. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-21

NOMENCLATURE

X is a displacement (linear or angular) of the hydraulic motor working member;

I is a coefficient of inertial load (mass or moment of inertia of moving parts reduced to the output link of the hydraulic motor);

D is a coefficient of dissipative load (the coefficient of speed friction of translational or rotary motion);

P is a factor of the positional load (linear or torsional rigidity);

q is a characteristic parameter of the hydraulic motor (effective area of the hydraulic cylinder or specific volume of the hydraulic motor);

Δp is a differential pressure on the hydraulic motor;

K_c, K_f, K_l is a coefficient of compressibility of the working fluid, flow rate coefficient of the control valve and leakage coefficient;

X_{cv} is a displacement of the control valve of the servo valve;

U_v is a control voltage;

K_{ux} is a transmission ratio of the electromechanical servo valve converter;

T_o, ξ_o, T_a is a parameters of typical dynamic links (oscillatory and aperiodic), the serial connection of which describes the dynamic characteristic of the electromechanical servo valve converter;

$V_{cv} = \dot{X}_{cv}$ is a speed of the control valve;

F_c is a effective area of the hydraulic cylinder;

V is a volume of working cavities and connecting channels of the hydraulic motor;

χ is a adiabatic module of the working fluid bulk elasticity;

C is a position load factor;

$U_v^{\max} = 5B$ is a maximum control voltage in the input circuit of the servo valve;

$\vec{X}_{set}$ is vector of setting effects;

$\vec{X}_{out}$ is vector of output parameters;

$\vec{X}_{in}$ is vector of internal parameters.

INTRODUCTION

Having emerged recently in various industries large demands in test equipment of various functional purposes led to the idea of a modular concept for constructing test complexes of precision automatic controllers, in particular, for automatic control systems [1] whose main goal is to minimize and unify technical solutions as well as the elemental base used to create the test equipment. One of such elements (modules) in the overall structure of this concept is the basic software and hardware complex (BSHC) designed to control the electro-hydraulic drives of imitation dynamic stands. The development of the BSHC was carried out with the cooperation of the authors with the scientific and production enterprise "Teploavtomat" under a contract with the Ministry of Machine-Building Industry of Ukraine within the framework of the state program "Instrument Engineering".

The object of study the automatic control system with an optional technological object of increased precision.

The subject of study: the processes of providing the precision and operation speed of regulation systems.

The purpose of the work creating the software and hardware complex for precision regulation and control systems, ensuring high precision and operation speed based on parametric synthesis and using multiplication methods.

1 PROBLEM STATEMENT

According to a vector of input (driving) effects $\vec{X}_{set}$ including the necessary set of kinematic ($X_{set}, \dot{X}_{set}, \ddot{X}_{set}$) and power characteristics (F_{set}, P_{set}) it is necessary to determine the law of control actions $\vec{U}_y(t)$ that ensures the minimum (permissible) deviation of the corresponding components of the output parameters vector $\delta = \vec{X}_{out} - \vec{X}_{set}$ ($\vec{X}_{out}\left\{X_{out}, \dot{X}_{out}, \ddot{X}_{out}, F_{out}, P_{out}\right\}$) taking into account the technological and operational constraints vectors for input and internal parameters $\vec{X}_{out}^{\min} \le \vec{X}_{out} \le \vec{X}_{out}^{\max}$, $\vec{X}_{in}^{\min} \le \vec{X}_{in} \le \vec{X}_{in}^{\max}$. The optimization criterion can be the minimum of the integral of the product of the absolute error and the time $I = \min \int |\varepsilon(t)| t dt$ which provides the optimal compromise between static and dynamic accuracy.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

A large number of works of a number of scientific schools and groups both in Ukraine and in the near and far abroad are devoted to the developments and research of the EHSS.

The initial scientific basis for the creation and study of EHSS should be considered the fundamental, universal work plan in the field of hydraulic drives, the theory of automatic control, technical cybernetics. Such works may include the works by G.I. Kaniuk [1, 2] in which the principles of creating high-speed precision electro-hydraulic tracking systems in relation to test benches are considered. Special attention is paid to the improvement of electric and electro-hydraulic control systems [3, 4], their optimization [5, 6] and the improvement of the energy efficiency of their work [7]. About 90–95% of the regulators that are currently in operation use PID algorithms. In this regard, attention is paid to the use and improvement of PID controllers [8, 9]. The parameters of the regulators are optimized in order to improve the quality of regulation [10]. Various modifications of regulators are being studied [11, 12]. The principle of robust control is successfully used, which allows improving the quality of regulation [13]. Studies are being conducted to improve the efficiency of management

© Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu, Kniazieva V. N., Khoroshun D. M., Fursova T. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-21

systems in various areas of economic activity, for example, in railway transport [14] and in energy [15].

Nevertheless, despite the large number of diverse, interesting and useful works in this area, currently there is not a sufficiently systematized and universal theoretical base for creating and researching precision high-speed EHSS, which complicates and slows down the processes of their development and implementation. Existing methods are either general metatheories that require filling with specific applied methods, mathematical models and technical solutions, or are aimed at solving particular problems: typical design engineering, verification calculations, and parametric optimization of already existing or designed systems. In this regard, applied theories and methodologies that would encompass all stages of creating high-speed precision EHSS are necessary.

3 MATERIALS AND METHODS

The aim of this work is the general presentation of the results of theoretical and experimental studies dedicated to the creation of the unified software and hardware complex for the precise control of electro-hydraulic servo systems of various functional purposes.

The BSHC includes the following main elements: a digital programmable set-point device which provides the formation of the required loading modes and emergency protection of the stand; a high-speed analog controller implementing efficient electro-hydraulic drive (EHD) control algorithms to provide the required dynamic characteristics of the test equipment; a personal computer that performs the functions of a top-level management system (coordination of several digital set-points in accordance with a specified test program, visual control, processing and registration of test results).

The general functional diagram of the BSHC is presented in Fig. 1.

Structurally the BSHC is a stand in which the following blocks are located: a microcontroller based on a single-chip microcomputer with an inter-module communication interface; blocks of analogue regulators; power unit; power amplifiers; power supplies; a network unit; a channel power transformer.

In the research plan the main problem in the creation of the BSHC was the development of an optimal structure of precision high-speed regulators since they play a major role in providing the required dynamic characteristics of the drives.

Taking into consideration quite high requirements to static and dynamic characteristics of electro-hydraulic drives, it was decided to use the following control algorithms in analogue controllers of the BSHC:

– the algorithm of proportional-differential-integral control by error (a proportional integral differential controller – PID-controller);

– the algorithm for state parameters of the EHD (a state controller) using the results of their direct measurements or the results of calculations based on the standard model (a state observer);

– the algorithm based on the method of solving the inverse problem of the dynamics of the EHD.

Comparative performance characteristics of various control algorithms of a standard size of the EHD of the simulation dynamic bench are presented in Fig. 2.

The structure of analog regulators provides the possibility of use, if necessary, other types of control algorithms.

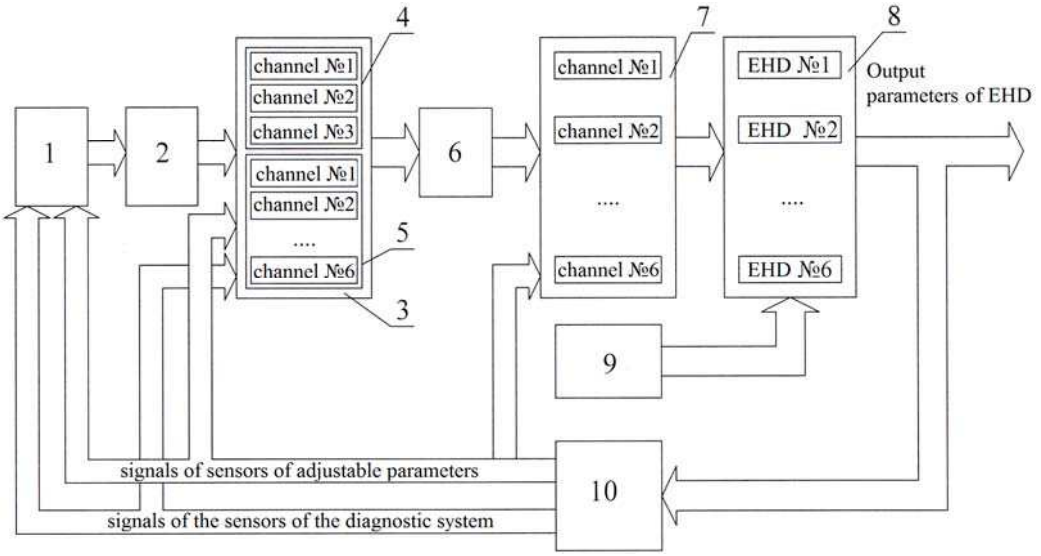


Figure 1 – The general functional diagram of the basic software and hardware control complex of electro-hydraulic drive test stands:

1 – upper-level control computer (personal computer); 2 – inter-module communication interface; 3 – digital programmable set-point device; 4 – unit for setting the operating modes of the EHD; 5 – block of the control, diagnostics and indication of operating modes of the EHD; 6 – digital-to-analog converter; 7 – block of analog regulators; 8 – electro-hydraulic drives (EHD); 9 – analog generator of special signals; 10 – sensor of adjustable parameters and diagnostic systems

© Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu, Kniazieva V. N., Khoroshun D. M., Fursova T. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-21

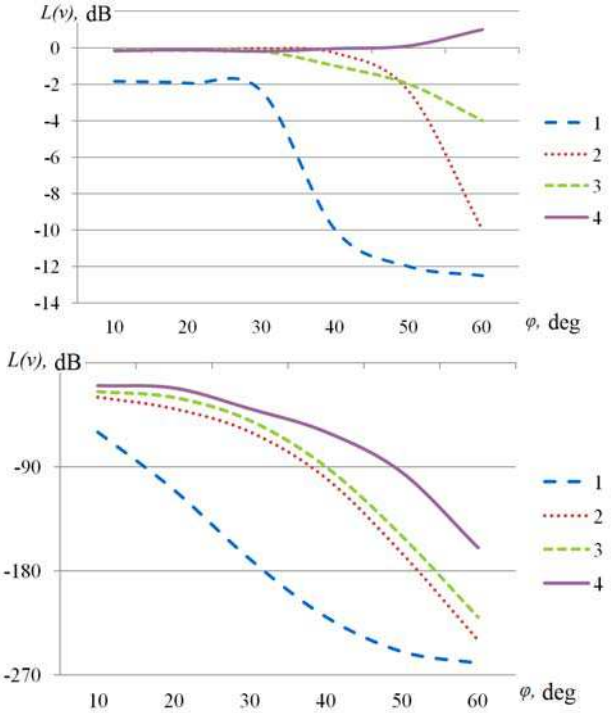


Figure 2 – Influence of various control laws on the dynamic characteristics of an electro-hydraulic drive:
1 – proportional regulator; 2 – PID controller;
3 – modal controller for three state parameters;
4 – regulator built on the principles of inverse dynamic problems

The general linearized mathematical model of the EHD including the executive hydraulic motor and the control servo valve can be represented as a system of usual differential equations of the sixth order [2]:

$$\begin{cases} I\ddot{X} + D\dot{X} + PX = q\Delta p, \\ K_{\text{c}}\Delta\dot{p} = 2K_f X_{\text{cv}} - 2q\dot{X} - K_l\Delta p, \\ T_o\ddot{X}_{\text{cv}} + 2\xi_o T_o\dot{X}_{\text{з}} + X_{cv} = K_{\text{ux}}U_v', \\ T_{\text{a}}\dot{U}_v' + U_v' = U_v. \end{cases} \quad (1)$$

In this case, in order to ensure a set quality control in the high-frequency region, the control algorithms used in analog regulators must also have a minimum of sixth order. At the same time the procedures of theoretical synthesis and practical adjustment of regulators are significantly complicated. However, when proportional servo valves with a high pass-band are used in the EHD (Fig. 3), the control valve position is equipped with sensors, it is possible to reduce the order of the regulators by using the principle of multiplicative control (separate control of the positions of the control valve and hydraulic motor [2]). In this case separate circuits can operate from two autonomously adjusted regulators of the third (or, depending on the type of load and range of reproduced frequencies, and lower) of the order of one type or another.

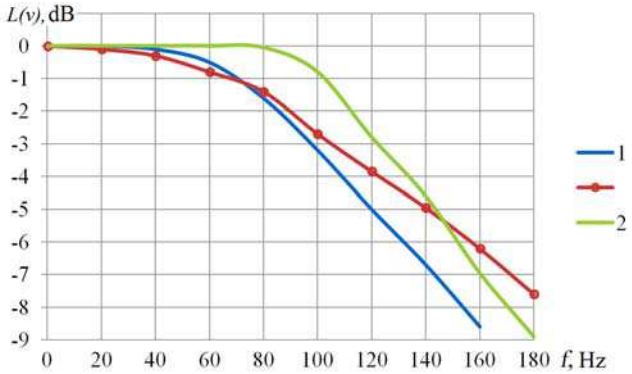


Figure 3 – Amplitude-frequency characteristics of the servo valve УЭГ-СВ-100:
– O without correction, experiment; 1 – without correction, calculation (approximation by the vibrational link T=1.67·10 s, ξ=0,7); 2 – correction with the help of PID-controller (K=300, T_{d}=0.07 c, T_{e}=0.3 s)

4 EXPERIMENTS

Development and debugging of the experimental the BSHC sample were carried out using the mathematical and electronic model (simulator) of the electro-hydraulic drive of the test stand for testing the plain bearings of internal combustion engines of trucks. The EHD of such a stand is a hydraulic cylinder with a control servo valve designed to reproduce dynamic loads acting on the crankshaft main bearings. The range of reproducible loads is 50 tons, the required drive bandwidth is 100 Hz.

Estimated calculations have shown that the main load is due to the rigidity of the test objects (thus, the load is mainly positional). Calculations showed that using the principle of multiplicative control, it is possible to reduce the dynamic distortion of the output parameter of the servo valve (this task was solved by including the PID controller in the autonomous regulation circuit of the control valve). Figure 4 presents the amplitude-frequency characteristics of the servo valve with a contour of autonomous correction of the control valve position and without it.

It follows from the graphs that the dynamical characteristic of the servo valve in the required frequency range (up to 100 Hz) corrected by the PID-controller can be satisfactorily described by the oscillating link with the values of the time constant T_{c} and the relative damping factor ξ_{k}, respectively $1\cdot10^{-3}$ s and 0.7. In this case, taking into consideration the positional character of the main load, the general mathematical model of the EHD in matrix form and taking into account the control voltage limit in the input circuit of the servo valve takes the form:

$$\begin{pmatrix} \dot{H} \\ \dot{X}_{cv} \\ \dot{V}_{cv} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_h} & \frac{K_h}{T_h} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_{\text{к}}^2} & -2\xi_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H \\ X_{cv} \\ V_{cv} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{\text{ux}}}{T_o^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ U_v \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$|U_v| \le U_v^{\max}.$$

© Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu, Kniazieva V. N., Khoroshun D. M., Fursova T. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-21

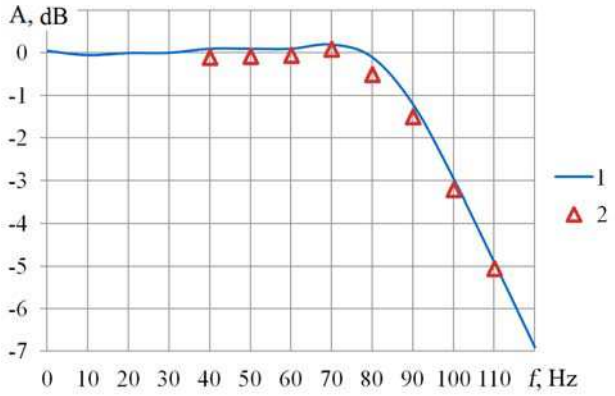


Figure 4 – Amplitude-frequency characteristic of the electro-hydraulic drive with the PID-controller:
1 – calculation, 2 – experiment

The load on the rod of the hydraulic cylinder:

$$H = F_c \Delta P .$$

The time constant and the static transmission ratio of the hydraulic motor:

$$T_h = F_c (0,5 \frac{V}{\chi F_c} + \frac{2F_c}{C}) / K_y ;$$

$$K_h = 2K_x F_c / K_y .$$

Calculations showed that the use of a PID-controller with gain values, time constants of the differentiating and integrating link is 10 V/V respectively; 0.1 s and $5 \cdot 10^{-3}$ s, it is possible to obtain the required bandwidth (about 100 Hz) for the adopted the EHP model (Fig. 4).

After fabricating and debugging of the experimental BSHC sample, its functional and dynamic characteristics were verified by laboratory tests at the research-and-production enterprise "Teploavtomat" using an electronic model (simulator) of the EHD, the structure and parameters of which corresponded to the mathematical model. The test results confirmed the calculated bandwidth of the EHD.

5 RESULTS

Conducted studies have allowed us to obtain the following results:

– a number of standard sizes of the high-speed precision EHSS based on incomplete rotating hydraulic motors with a torque range of up to 40 kNm was developed, ensuring the reproduction in the tracking mode of specified input effects with a bandwidth of up to 20 Hz, positioning precision of up to one corner minute and control range up to 10^4;

– on the basis of the developed EHSS, automated simulated dynamic test stands for testing of guidance systems for mobile objects (the customer – Central Research Institute of Chemistry and Mechanics, Moscow) and for testing semi-axle transmissions (the customer – Publicly Traded Company "KAMAZ", Naberezhnye Chelny) were created and brought to practical use.

6 DISCUSSION

As a result of a series of theoretical and experimental studies carried out within the framework of state budget research (the customer – Ministry of Education and Science of Ukraine) on the basis of solving the inverse problem of dynamics, the high-speed precision controller for the control loop of the position of the steam turbine actuator valves was synthesized, which compensates all major types of static and dynamic errors and more than a twofold increase in operation speed compared with the baseline while maintaining the permissible reserves of stability (the results of the work are used in long-term projects of the State energy company "Centrenergo" NNEGC "Energoatom" and "Institute of Control Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine".

All developments and technical solutions have been tested experimentally (research tests and acceptance tests) and implemented at customer enterprises, which confirms the reliability and practical value of the scientific positions and results as well as determines the possibility of their further effective use when creating the high-speed precision EHSS for various fields of technology in order to increase the productivity and precision of technological equipment, increase energy – and resource indicators of production.

Experimental studies and practical engineering confirmed that the developed scientific positions and the results of the work generally provide the effective practical results consisting in a significant reduction of the time and money spent on the creation and completion of new facilities due to the systematization and unification of the most responsible and knowledge-intensive stages of the design of the EHSS (a technical project and proposal).

The results of the work were used in the implementation of a number of fundamental and applied research to create the high-speed precision EHSS of imitation dynamic stands for enterprises of the defense and engineering industries.

CONCLUSIONS

Based on the well-known general principles of the modern theory of optimal control, practical engineering techniques for synthesizing effective laws of controling the precision electro-hydraulic systems, as well as a number of effective regulators that provide high (approaching to the utmost in energy capabilities) characteristics of precision and operation speed are proposed.

Scientific novelty:

– the principle of multiplicative control is proposed, which makes it possible to synthesize effective control algorithms for the individual, autonomous, fully controllable and observable EHSS circuits based on third-order mathematical models;

– for the selected autonomous control loops, effective control laws are obtained on the basis of modal control methods and solving inverse dynamic problems (including – calculation formulas for choosing optimal parameters of regulator parameters);

– in contrast to the existing methods of the linear theory of optimal control, the proposed methods of synthesis take into account, with the help of the method of harmonic linearization, real nonlinear characteristics of the control

© Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu, Kniazieva V. N., Khoroshun D. M., Fursova T. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-21

power limit, which allows to determine the real rational relations of the regulator parameters and the real limit values of precision and operation speed, and also to prevent the occurrence of undesirable self-oscillatory regimes in systems;

– in order to reduce the number of measured parameters used in the formation of the proposed control laws, universal structures and formulas for calculating the parameters of reference models (state monitors) of autonomous EHSS control loops have been obtained on the basis of known general principles for the synthesis of observing identification devices.

Practical value: The technique of autonomous testing and debugging of the EHSS control system using the electronic simulator EHA is improved, which allows to significantly reduce the time and money spent on the creation and completion of the complex system.

Prospects for further research: The use of the proposed methods to create precision high-speed control systems of technological objects in various sectors of economic activity.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the State research project: "Development of the theoretical foundations and practical principles of the creation of precision high-speed electro-hydraulic tracking systems for energy and resource saving", registration number 0109U008660.

The authors are also grateful to the Zmiivska thermal power plant (TPP) on the base of which research was carried out that found their introduction when implementing business contracts on the following topics: "Development of the practical principles of energy-saving control systems integration in the automated control systems of technological processes of the Zmiivska TPP power units" № 14-10-15/87 and "Development of complex measures for improving the technical and economic characteristics of the Zmiivska TPP power units" № 16-28-15/751.

REFERENCES

1. Kaniuk G. I. High-speed precision electrohydraulic servo systems (ECGS). Fundamentals of the theory. Development. Research. Monograph. Kharkov, Publishing house "Point", 2008, 108 p.
2. Kaniuk G. I., Osadchiy A. Kh., Katykhin K. N., A.N. Shuvanov and et al. Basic program-technical complex for control of electrohydraulic drives of test stands, *Bulletin of Science and Technology*. Kharkov, 1997, Issue 2, P. 15–18.
3. Titarenko V. B. Increasing the energy efficiency of volume hydraulic drives, *Young Scientist*, 2017, No. 51, pp. 97–99.
4. Johnson J. Engineering Essentials: Electrohydraulic Motion Control. Hydraulics & Pneumatics. Jan 01, 2012 https://www.hydraulicspneumatics.com/200/FPE/SystemDesign/Article/False/6463/FPE-SystemDesign
5. Walters R. B. Hydraulic and Electric-Hydraulic Control Systems. Springer Science+Business Media B.V., 2000. ISBN 978-94-015-9429-5
6. Banyai, D. Vaida, L. Electro-hydraulic Control System For Variable Displacement Machines 12th International Conference "Automation in Production Planning and Manufacturing", Zilina, 2011.
7. Watton J. Electrohydraulic Control System: Principles Of Operation, Circuit Analysis & Design. 2016. ISBN 978-87-403-1187-7
8. Eker İ. Robust governor design for hydro turbines using a multivariable-cascade control approach. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2003, Vol. 28, No. 28.
9. Astrom K. J., Hagglund T. Advanced PID control. SA, *The Instrumentation, Systems, and Automation Society,* 2006, 460 p. URL: https://www.twirpx.com/file/162015/ (data zvernennya: 10.04.2016).
10. Severin V. P., Nikulina E. N. Vector target functions for optimizating the quality indicators of automatic regulation systems, *The Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. Kharkiv, Issue 55, 2005, pp. 139–144.
11. Guillermo J. Silva, Aniruddha, Datta, & S. P. Bhattacharyya New Results on the Synthesis of PID Controllers, *IEEE transactions on automatic control*, Vol. 47, No. 2, February 2002. URL: https://wenku.baidu.com/view/a4e2c3619b6648d7c1c74632.html (data zvernennya: 10.04.2016).
12. Leva A., Cox C., & Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization. IFAC Professional Brief. URL: http://www.ifac-control.org (data zvernennya: 10.04.2016).
13. Eker İ. Robust governor design for hydro turbines using a multivariable-cascade control approach. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2003, Vol. 28, No. 28.
14. Stasiuk A. I., Goncharova L. L. Mathematical models and methods of analyzing computer networks for controlling the power supply of railways, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2018, Vol. 54, No. 1, pp. 184–192.
15. Artiukh S. F., Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu., Popov M. A., Bliznichenko E. N. Efficient energy-saving control of electrohydraulic servo systems. Monograph. Kharkov, Izd. "Point", 2012, 120 p. ISBN 978-617-669-019-1

Received 09.10.2018.
Accepted 16.12.2018.

УДК 658.5.011.56

УНІФІКОВАНИЙ БАЗОВИЙ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ

Канюк Г. І. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій Української інженерно-педагогічної академії, Харків, Україна.

Мезеря А. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій Української інженерно-педагогічної академії, Харків, Україна.

Князєва В. М. – аспірант кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій Української інженерно-педагогічної академії, Харків, Україна.

Хорошун Д. М. – аспірант кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій Української інженерно-педагогічної академії, Харків, Україна.

Фурсова Т. М. – доцент кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій Української інженерно-педагогічної академії, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Запропоновано методи синтезу прецизійних електрогідравлічних систем управління з використанням принципу мультиплікації. Використання принципу мультиплікації дозволяє створювати компактні системи управління технологічними об'єктами, мають високі показники точності і швидкодії.

Розглянуто задачу створення уніфікованого базового програмно-технічного комплексу для прецизійних систем автоматичного регулювання та керування довільним технологічним об'єктом.

На основі ефективних методів сучасної теорії оптимального управління розроблені алгоритми управління, що забезпечують максимальну компенсацію всіх видів статистичних і динамічних помилок управління.

© Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu, Kniazieva V. N., Khoroshun D. M., Fursova T. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-21

Об'єкт дослідження: система автоматичного регулювання довільним технологічним об'єктом підвищеної точності.

Предмет дослідження: процеси забезпечення точності і швидкодії систем регулювання.

Мета: створення програмно-технічного комплексу, для прецизійних систем регулювання і управління, що забезпечує високі показники точності і швидкодії, на основі параметричного синтезу і використання методів мультиплікації.

Актуальність. Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення точності систем керування технологічними об'єктами і розробки програмно-технічного комплексу для цих систем.

Метод. В роботі використовувалися методи оптимального управління, методи структурного синтезу. Для підтвердження достовірності розроблених моделей і принципів, використовувався метод експериментальних досліджень на базі діючого обладнання випробувальних стендів. Для налагодження експериментального зразка базового програмно-технічного комплексу для випробувань підшипників ковзання двигунів внутрішнього згоряння використовувалося математичне імітаційне моделювання електрогідравлічного приводу. Для синтезу прецизійного регулятора використовувався метод мультиплікації.

Результати. Розроблено ряд типорозмірів швидкодіючих прецизійних ЕГСС на базі неполноповоротние гідродвигунів з діапазоном крутних моментів до 40 кНм, що забезпечують відтворення в стежить режимі заданих вхідних впливів з пропускною здатністю до 20 Гц, точністю позиціонування до однієї кутової хвилини і діапазоном регулювання до 104. На базі розроблених ЕГСС створені і доведені до практичного використання автоматизовані імітаційні динамічні стенди для випробування систем наведення мобільних об'єктів (замовник – ЦНІІХМ, м. Москва) і для випробування піввісь трансмісій (замовник – АТ «КамАЗ», м. Набережні Челни). На основі результатів виконаних досліджень створено базовий програмно-технічний комплекс для випробувального обладнання підприємств сільськогосподарської, автомобільної та інших галузей промисловості. Синтезований швидкодіючий прецизійний регулятор контуру управління становищем регулюючих клапанів парової турбіни, що забезпечує компенсацію всіх основних видів статичних і динамічних помилок і більш ніж дворазове підвищення швидкодії в порівнянні з базовим варіантом при збереженні допустимих запасів стійкості (результати робіт використовуються в перспективних проектах Державної енергетичної компанії «Центренерго», НАЕК «Енергоатом», а також в МГП «Інститут проблем управління НАН України».

Висновки. Запропоновано практичні інженерні методики синтезу ефективних законів управління прецизійними електрогідравлічними системами, а також ряд ефективних регуляторів, що забезпечують високі характеристики точності і швидкодії. Запропоновано принцип мультиплікативного управління, що дозволяє синтезувати ефективні алгоритми управління окремими, автономними, повністю керованими і спостережуваними контурами ЕГСП на основі математичних моделей третього порядку. Для виділених автономних контурів управління отримані ефективні закони управління на основі методів модального управління і розв'язку обернених задач динаміки.У запропонованих методиках синтезу враховані, за допомогою методу гармонійної лінеаризації, реальні нелінійні характеристики обмеження потужності керуючого сигналу, що дозволяє визначати реальні раціональні співвідношення параметрів регуляторів і реальні граничні показники точності і швидкодії, а також запобігати виникненню небажаних автоколивальних режимів у системах. З метою зменшення кількості вимірюваних параметрів, використовуваних при формуванні запропонованих законів управління, на основі відомих загальних принципів синтезу спостерігають пристроїв ідентифікації отримані універсальні структури і формули для розрахунку параметрів еталонних моделей автономних контурів управління ЕГСС. Удосконалено методику автономних випробувань і налагодження системи управління ЕГСС з використанням електронного імітатора ЕГІМ, що дозволяє істотно скоротити витрати часу і коштів на створення і доведення комплексної системи.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: уніфікація, електрогідравлічні приводи, системи автоматичного управління, точність регулювання, швидкодія, алгоритми управління.

УДК 658.5.011.56

УНИФИЦИРОВАННЫЙ БАЗОВЫЙ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Канюк Г. И. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики и энергосберегающих технологий Украинской инженерно-педагогической академии, Харьков, Украина.

Мезеря А. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетики и энергосберегающих технологий Украинской инженерно-педагогической академии, Харьков, Украина.

Князева В. Н. – аспирант кафедры теплоэнергетики и энергосберегающих технологий Украинской инженерно-педагогической академии, Харьков, Украина.

Хорошун Д. М. – аспирант кафедры теплоэнергетики и энергосберегающих технологий Украинской инженерно-педагогической академии, Харьков, Украина.

Фурсова Т. Н. – доцент кафедры теплоэнергетики и энергосберегающих технологий Украинской инженерно-педагогической академии, Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Предложены методы синтеза прецизионных электрогидравлических систем управления с использованием принципа мультипликации. Использование принципа мультипликации позволяет создавать компактные системы управления технологическими объектами, обладают высокими показателями точности и быстродействия.

Рассмотрена задача создания унифицированного базового программно-технического комплекса для прецизионных систем автоматического регулирования и управления произвольным технологическим объектом.

На основе эффективных методов современной теории оптимального управления разработаны алгоритмы управления, обеспечивающие максимальную компенсацию всех видов статистических и динамических ошибок управления.

Объект исследования: система автоматического регулирования произвольным технологическим объектом повышенной точности.

Предмет исследования: процессы обеспечения точности и быстродействия систем регулирования.

Цель: создания программно-технического комплекса, для прецизионных систем регулирования и управления, обеспечивающего высокие показатели точности и быстродействия, на основе параметрического синтеза и использования методов мультипликации.

Актуальность. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения точности систем управления технологическими объектами и разработки программно-технического комплекса для этих систем.

© Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu, Kniazieva V. N., Khoroshun D. M., Fursova T. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-21

Метод. В работе использовались методы оптимального управления, методы структурного синтеза. Для подтверждения достоверности разработанных моделей и принципов, использовался метод экспериментальных исследований на базе действующего оборудования испытательных стендов. Для отладка экспериментального образца базового программно-технического комплекса для испытаний подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания использовалось математическое имитационное моделирование электрогидравлического привода. Для синтеза прецизионного регулятора использовался метод мультипликации.

Результаты. Разработан ряд типоразмеров быстродействующих прецизионных ЭГСС на базе неполноповоротных гидродвигателей с диапазоном крутящих моментов до 40 кНм, обеспечивающих воспроизведение в следящем режиме заданных входных воздействий с полосой пропускания до 20 Гц, точностью позиционирования до одной угловой минуты и диапазоном регулирования до 10^4. На базе разработанных ЭГСС созданы и доведены до практического использования автоматизированные имитационные динамические стенды для испытания систем наведения мобильных объектов (заказчик – ЦНИИХМ, г. Москва) и для испытания полуосей трансмиссий (заказчик – АО «КамАЗ», г. Набережные Челны). На основе результатов выполненных исследований создан базовый программно-технический комплекс для испытательного оборудования предприятий сельскохозяйственной, автомобильной и других отраслей промышленности. Синтезирован быстродействующий прецизионный регулятор контура управления положением регулирующих клапанов паровой турбины, обеспечивающий компенсацию всех основных видов статических и динамических ошибок и более чем двукратное повышение быстродействия по сравнению с базовым вариантом при сохранении допустимых запасов устойчивости (результаты работ используются в перспективных проектах Государственной энергетической компании «Центрэнерго», НАЭК «Энергоатом», а также в МГП «Институт проблем управления НАН Украины».

Выводы. Предложены практические инженерные методики синтеза эффективных законов управления прецизионными электрогидравлическими системами, а также ряд эффективных регуляторов, обеспечивающих высокие характеристики точности и быстродействия. Предложен принцип мультипликативного управления, позволяющий синтезировать эффективные алгоритмы управления отдельными, автономными, полностью управляемыми и наблюдаемыми контурами ЭГСП на основе математических моделей третьего порядка. Для выделенных автономных контуров управления получены эффективные законы управления на основе методов модального управления и решения обратных задач динамики. В предложенных методиках синтеза учтены, при помощи метода гармонической линеаризации, реальные нелинейные характеристики ограничения мощности управляющего сигнала, что позволяет определять реальные рациональные соотношения параметров регуляторов и реальные предельные показатели точности и быстродействия, а также предотвращать возникновение нежелательных автоколебательных режимов в системах. С целью уменьшения количества измеряемых параметров, используемых при формировании предложенных законов управления, на основе известных общих принципов синтеза наблюдающих устройств идентификации получены универсальные структуры и формулы для расчета параметров эталонных моделей автономных контуров управления ЭГСС. Усовершенствована методика автономных испытаний и отладки системы управления ЭГСС с использованием электронного имитатора ЭГИМ, позволяющая существенно сократить затраты времени и средств на создание и доводку комплексной системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: унификация, электрогидравлические приводы, системы автоматического управления, точность регулирования, быстродействие, алгоритмы управления.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Канюк Г. И. Быстродействующие прецизионные электрогидравлические следящие системы (ЭГСС). Основы теории. Разработка. Исследования : монография / Г. И. Канюк. – Х. : Издательство НТМТ, 2008. – 108 р.
2. Базовый программно-технический комплекс для управления электрогидравлическими приводами испытательных стендов / [Г. И. Канюк, А. Х. Осадчий, К. Н. Катыхин и др.] // Вестник науки и техники. – 1997. – Вып. 2. – С. 15–18.
3. Титаренко В. Б. Повышение энергоэффективности объемных гидроприводов [Электронный ресурс] / В. Б. Титаренко. – Молодой ученый. – 2017. – № 51. – С. 97–99. URL https://moluch.ru/archive/185/47487/ (дата обращения: 18.11.2018).
4. Johnson J. Engineering Essentials: Electrohydraulic Motion Control. Hydraulics & Pneumatics. [Electronic resource] / J. Johnson. – Acces mode: https://www.hydraulicspneumatics.com/200/FPE/SystemDesign/Article/False/6463/FPE-SystemDesign
5. Walters R. B. Hydraulic and Electric-Hydraulic Control Systems / R. B. Walters. – Springer Science+Business Media B. V., 2000. ISBN 978-94-015-9429-5
6. Banyai D. Electro-hydraulic Control System For Variable Displacement Machines 12th International Conference “Automation in Production Planning and Manufacturing” / D. Banyai, L. Vaida // Conference. – Zilina, 2011.
7. Watton J. Electrohydraulic Control System: Principles Of Operation, Circuit Analysis & Design / J. Watton. – 2016. ISBN 978-87-403-1187-7
8. Eker İ. Robust governor design for hydro turbines using a multivariable-cascade control approach / İ. Eker // The Arabian Journal for Science and Engineering. – 2003. – Vol. 28, No. 28.
9. Astrom K. J. Advanced PID control. SA. The Instrumentation, Systems, and Automation Society [Electronic resource] / K. J. Astrom, T. Hagglund, 2006. – 460 p. URL: https://www.twirpx.com/file/162015/ (дата звернення: 10.04.2016).
10. Северин В. П. Векторные целевые функции для оптимизации показателей качества систем автоматического регулирования / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Вып. 55. – Харьков. – 2005. – С. 139–144.
11. Guillermo. Bhattacharyya New Results on the Synthesis of PID Controllers [Electronic resource] / Guillermo, J. Silva, Aniruddha, Datta, & S. P. // IEEE transactions on automatic control. – 2002. – No. 2. URL: https://wenku.baidu.com/view/a4e2c3619b6648d7c1c74632.html (дата звернення: 10.04.2016).
12. Leva A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization [Electronic resource] / A. Leva, C. Cox & A. Ruano // IFAC Professional Brief. URL: http://www.ifac-control.org (дата звернення: 10.04.2016).
13. Eker İ. Robust governor design for hydro turbines using a multivariable-cascade control approach / İ. Eker // The Arabian Journal for Science and Engineering. – 2003. – Vol. 28, No. 28.
14. Стасюк А. И. Математические модели и методы анализа компьютерных сетей управления электроснабжением железных дорог / А. И. Стасюк, Л. Л. Гончарова // Кибернетика и системный анализ. – 2018. – Том 54, № 1. – С. 184–192.
15. Эффективное энергосберегающее управление электрогидравлическими следящими системами : монография / [С. Ф. Артюх, Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря и др.]. – Харьков : Изд. «Точка», 2012. –120 с. ISBN 978-617-669-019-1

© Kaniuk G. I., Mezeria A. Yu, Kniazieva V. N., Khoroshun D. M., Fursova T. N., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-21

Наукове видання

Радіоелектроніка,

інформатика,

управління

№ 2/2019

Науковий журнал

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

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

Комп'ютерне моделювання та верстання — С. В. Зуб
Редактор англійських текстів — С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

Підписано до друку 28.05.2019. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 24,41.
Тираж 300 прим. Зам. № 636.

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.