



Доклады ТУСУР. 2020 • Том 23, № 2

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442



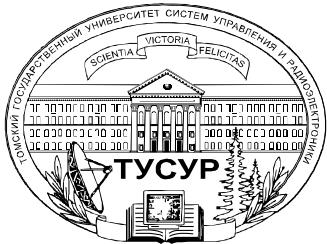
# ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники

2020 • Том 23, № 2



9 771818 044708 02007



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ  
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
2020, том 23, № 2**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

**В.М. Рулевский**, к.т.н., доцент, ректор ТУСУРа, научный руководитель направления НИИ АЭМ ТУСУРа, Томск, Россия (*гл. редактор*).  
**А.А. Шелупанов**, д.т.н., проф., президент ТУСУРа, заслуженный работник высшей школы РФ, почётный работник науки и техники РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования, дважды лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2393-6701> (*зам. гл. редактора*).

**А.Г. Лоцилов**, к.т.н., доцент, проректор по научной работе и инновациям, зав. каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, ТУСУР, Томск, Россия (*зам. гл. редактора*).

**В.Н. Масленников**, к.т.н., доцент, ТУСУР, Томск, Россия (*отв. секретарь*).

**М.П. Батура**, д.т.н., проф., гл. науч. сотрудник, БГУИР, заслуженный работник образования Республики Беларусь, Минск, Беларусь.  
**Б.А. Беляев**, д.т.н., проф., зав. лабораторией ЭИСВЧЭ, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, заслуженный изобретатель России, Красноярск, Россия.

**Ян Браун (Jan G. Brown)**, PhD, Национальная лаборатория им. Лоуренса, Беркли, Калифорния, США.

**С.А. Гаврилов**, д.т.н., проф., проректор по ИР, НИУ «Московский институт электронной техники» (МИЭТ), лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-2967-272X>.

**Ю.П. Ехлаков**, д.т.н., проф., проф. каф. автоматизации обработки информации, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, почётный работник высшего профессионального образования РФ, Томск, Россия.

**В.М. Исаев**, д.т.н., первый заместитель директора, Мытищинский НИИ радиоизмерительных приборов, почётный работник науки и техники РФ, почётный работник электронной промышленности, Мытищи, Московская обл., Россия.

**А.В. Кобзев**, д.т.н., проф., проф. каф. промышленной электроники, ТУСУР, Томск, Россия, почётный работник науки и техники РФ, почётный работник высшего профессионального образования России, Томск, Россия.

**А.М. Кориков**, д.т.н., проф., зав. каф. автоматизированных систем управления, ТУСУР, заслуженный деятель науки РФ, почётный работник науки и техники РФ, почётный работник высшего профессионального образования РФ, Томск, Россия.

**Ю.Н. Кульчин**, д.ф.-м.н., академик РАН, директор, ФГБун «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН», Владивосток, Россия.

**В.Ш. Меликян (Vazgen Shavarsh Melikyan)**, д.т.н., проф., чл.-корр. НАН Республики Армения, ЗАО «Синописис Армения», Ереван, Республика Армения, заслуженный деятель науки Республики Армения, Армения, Ереван, <https://orcid.org/0000-0002-1667-6860>.

**С.Д. Одинцов**, д.ф.-м.н., проф., иностранный член Норвежской академии наук, проф. Института космических исследований, Барселона, Испания.

**Е.М. Окс**, д.т.н., проф., зав. каф. физики, ТУСУР, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-9323-0686>.

**Э.Д. Павлыгин**, к.т.н., зам. ген. директора по науке, ФНПЦ АО «Научно-производственное объединение (НПО) «МАРС», Ульяновск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-6255-8865>.

**Н.А. Ратахин**, д.ф.-м.н., академик РАН, директор, Институт сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3820-8777>.

**В.К. Сарьян**, д.т.н., проф., академик Национальной академии наук (НАН) Республики Армения, проф., Московский физико-технический институт (МФТИ), научный консультант, НИИ радио, заслуженный работник связи РФ, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники, лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Москва, Россия.

**А.Р. Сафин**, к.т.н., доц., НИУ «МЭИ», Москва, Россия.

**П.Е. Троян**, д.т.н., зав. каф. физической электроники, ТУСУР, почётный работник высшего профессионального образования РФ, почётный работник науки и техники РФ, Томск, Россия.

**И.А. Ходашинский**, д.т.н., проф., проф. каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа, вед. науч. сотрудник лаб. медико-биологических исследований (ЛМБИ), Томск, Россия.

**В.В. Шайдуров**, д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН, зав. отделом, ФГБун «Институт вычислительного моделирования СО РАН», научный руководитель научного направления «Математическое моделирование», Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), Красноярск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7883-5804>.

**С.М. Шандаров**, д.ф.-м.н., проф., зав. каф. электронных приборов, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, член Оптического общества Америки (OSA), член Международного НТО IEEE/LEOS, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-9308-4458>.

**Ю.А. Шурыгин**, д.т.н., проф., директор департамента управления и стратегического развития, ТУСУР, научный руководитель НИИ АЭМ ТУСУРа, зав. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании, заслуженный деятель науки РФ, почётный работник высшего профессионального образования РФ, почётный работник науки и техники РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Томск, Россия.

Адрес редакции: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР, тел. (382-2) 51-21-21

Свидетельство о регистрации МНС РФ № 1027000867068 от 13 октября 2004 г.

Почтовый индекс 20648 в каталоге агентства «Роспечать»: газеты и журналы.

Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники  
634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел. (382-2) 51-21-21.

Верстка, техническое редактирование, подготовка оригинал-макета В.М. Бочкаревой.  
Корректор В.Г. Лихачева.

Подписано в печать 25.06.2020.

Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 8,25. Тираж 500. Заказ 13.

---

**Editorial board**

<b>Viktor M. Rulevskiy</b>	Editor in Chief, Rector of TUSUR University, Scientific adviser at the Research Institute of Automation and Electromechanics (RI AEM) TUSUR, Candidate of Engineering.
<b>Alexander A. Shelupanov</b>	Deputy Editor in Chief, President of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor, Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Laureate of the Russian Federation Government Prize in Education, Twice Laureate of the Russian Federation Government Prize in Science and Technology, Tomsk, Russia, <a href="https://orcid.org/0000-0003-2393-6701">https://orcid.org/0000-0003-2393-6701</a> .
<b>Anton G. Loschilov</b>	Deputy Editor in Chief, Vice-Rector for Research and Innovations of TUSUR University, Head of the Department of design of components and parts of electronic equipment, TUSUR University, Candidate of Engineering.
<b>Viktor N. Maslennikov</b>	Executive Secretary of the Editor's Office, Candidate of Engineering-
<b>Mikhail P. Batura</b>	Chief Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), Doctor of Engineering, Professor.
<b>Boris A. Belyaev</b>	Head of the Electrodynamics Department, Institute of Physics SB RAS (Krasnoyarsk), Doctor of Engineering.
<b>Ian G. Brown</b>	PhD in Plasma Physics, Lawrence Berkeley National Laboratories (California USA).
<b>Sergei A. Gavrilov</b>	Vice Rector for Research, National Research University of Electronic Technology (MIET, Moscow), Doctor of Engineering, Professor.
<b>Yury P. Ekhlakov</b>	Professor of the Department of Data Processing Automation, TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
<b>Vyacheslav M. Isaev</b>	First Deputy Director of the Mytishchi Research Institute of Radio Measurement Instruments, Doctor of Engineering.
<b>Anatoly V. Kobzev</b>	Professor of the Department of Industrial Electronics, TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
<b>Anatoly M. Korikov</b>	Head of the Department of Automated Control Systems of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
<b>Yury N. Kulchin</b>	Director of the Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok), Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics.
<b>Vazgen Sh. Melikyan</b>	Director of the Academic Department of Synopsis Armenia (Yerevan, Armenia), Correspondent Member of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Engineering, Professor.
<b>Sergey D. Odintsov</b>	International Member of the Norwegian Academy of Science and Letters, Professor at Institute of Space Sciences, Barcelona, Spain, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
<b>Yefim M. Oks</b>	Head of the Department of Physics, TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
<b>Eduard D. Pavlygin</b>	First Deputy General Director for Research of Federal Research-and-Production Center JSC R&P Mars, Candidate of Engineering.
<b>Nikolay A. Ratakhin</b>	Director of Institute of High Current Electronics SB RAS, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics.
<b>Vilyam K. Saryan</b>	Scientific Adviser at the Research Institute of Radio (Moscow), Academician of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Engineering, Professor.
<b>Ansar R. Safin</b>	Associate Professor, Department of Formation and Processing of Radio Signals, National Research University MPEI (Moscow), Candidate of Engineering.
<b>Pavel E. Troyan</b>	Vice-Rector for Academic Affairs, Head of Department of Physical Electronics, Doctor of Engineering, Professor.
<b>Ilya A. Khodashinsky</b>	Professor at Department of Complex Information Security of Computer Systems, TUSUR University, Leading Researcher at Laboratory of Medical and Biological Studies (LBMS), Tomsk, Russia, Doctor of Engineering, Professor.
<b>Vladimir V. Shaidurov</b>	Director of the Institute of Computational Modeling SB RAS (Krasnoyarsk), Correspondent Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
<b>Stanislav M. Shandarov</b>	Head of the Department of Electronic Devices, TUSUR University, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
<b>Yury A. Shurygin</b>	First Vice-Rector of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.

---

 Содержание

## ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**Мовчан А.К., Капустин В.В., Курячий М.И., Чалдина Е.С.**

Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности активно-импульсными телевизионными измерительными системами ..... 7

## УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

**Авсентьев А.О., Кругов А.Г., Перова Ю.П.**

Функциональные модели защиты информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений объектов информатизации ..... 17

**Колтайс А.С., Шатрова А.А., Шелупанов А.А.**

Математическая модель выбора контрагента при оценке рисков информационной безопасности ..... 36

**Целых А.Н., Целых Л.А., Васильев В.С.**

Обеспечение безопасности сложных систем на основе выявления влияний в графовых моделях ..... 42

**Куртукова А.В., Сваровская Е.Е., Романов А.С.**

Оценка влияния обфускации на процесс идентификации автора программного кода ..... 50

**Горитов А.Н., Гончаров К.В.**

Планирование траектории движения манипуляционного робота в неизвестной среде на основе алгоритма муравьиных колоний ..... 55

**Боровской И.Г., Харченко И.К.**

Модификация иерархических битовых индексов для повышения производительности систем управления базами данных ..... 65

**Барышева А.Е., Марков А.С., Мицель А.А.**

Модель оценки долгосрочной корреляции активов портфеля ..... 73

**Городович А.В., Кречетов И.А., Кручинин В.В., Перминова М.Ю.**

Инструментальная система анализа и оценивания учебного контента ..... 81

**Катаев М.Ю., Мосяев А.Е.**

Определение положения головы относительно цифровой видеокамеры, установленной на компьютере ..... 89

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**Осипов А.В., Журавлев И.М.**

Резонансные преобразователи постоянного напряжения с кодо-импульсным регулированием ..... 97

**Киселев П.В., Букреев В.Г., Гебгардт В.А.**

Моделирование передачи помехи от воздействия электростатического разряда через кабельную сеть космического аппарата ..... 103

**Рекутов О.Г., Юдинцев А.Г.**

Анализ способов построения имитаторов солнечных батарей для физического моделирования систем электроснабжения космических аппаратов ..... 108

**Токарев В.Г., Брованов С.В., Дыбко М.А.**

Методика вычисления коэффициента гармоник сетевого тока в трехфазной сети ..... 116

**Паюк Л.А., Воронина Н.А., Ляпунов Д.Ю.**

Специальные режимы работы в безредукторном электроприводе вибростола ..... 122

**Требования** ..... 132

## ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

<b>Movchan A.K., Kapustin V.V., Kuryachy M.I., Chaldina E.S.</b> Methods and algorithms for precision distance measurement by active-pulse television measuring systems .....	7
--	---

## CONTROL, COMPUTER SCIENCE, AND INFORMATICS

<b>Aysentev A.O., Krugov A.G., Perova Yu.P.</b> Functional models of information protection against leakage due to spurious electromagnetic emissions of informatization objects .....	17
<b>Koltays A.S., Shatrova A.A., Shelupanov A.A.</b> Mathematical model for selecting a contractor to assess information security risks .....	36
<b>Tselykh A.N., Tselykh L.A., Vasilev V.S.</b> Providing security for complex systems based on influence detection in graph models .....	42
<b>Kurtukova A.V., Svarovskaya E.E., Romanov A.S.</b> Assessing the impact of obfuscation on the process of identifying the author of a program code .....	50
<b>Goritov A.N., Goncharov K.V.</b> Motion trajectory planning for a multi-link manipulator in an unknown environment based on ant colony optimization .....	55
<b>Borovskoy I.G., Kharchenko I.K.</b> Hierarchical bitmap index modification to improve performance of database management systems .....	65
<b>Barysheva A.E., Markov A.S., Mitcel A.A.</b> New approach to the assessment of portfolio long-term correlation .....	73
<b>Gorodovich A.V., Krechetov I.A., Kruchinin V.V., Perminova M.Yu.</b> Tool system for analysis and evaluation of learning content .....	81
<b>Kataev M.Yu., Mosyaev A.E.</b> Determining the head position regarding the digital video camera installed on a computer .....	89

## ELECTRICAL ENGINEERING

<b>Osipov A.V., Zhuravlev I.M.</b> Resonant DC-DC Converter with Code-pulse control.....	97
<b>Kiselev P.V., Bukreev V.G., Gebgardt V.A.</b> Modeling of electrostatic discharge impact transmitting through spacecraft cabling .....	103
<b>Rekutov O.G., Yudintsev A.G.</b> Analysis of solar array simulators constructing methods for spacecraft power supply system`s physical modeling .	108
<b>Tokarev V.G., Brovanov S.V., Dybko M.A.</b> Technique to calculate total harmonic distortion of phase current in a three-phase power system .....	116
<b>Payuk L.A., Voronina N.A., Lyapunov D.Y.</b> Special Modes of Vibratory Electric Drive.....	122
<b>Manuscript requirements</b> .....	132

**ЭЛЕКТРОНИКА,  
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**



УДК 621.397.01

А.К. Мовчан, В.В. Капустин, М.И. Курячий, Е.С. Чалдина

## Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности активно-импульсными телевизионными измерительными системами

Рассматриваются методы измерения дальности до объектов с использованием активно-импульсных телевизионных измерительных систем. Рассмотренные методы в большей степени основаны на обработке видеокadres, полученных с использованием активно-импульсных систем, при этом методы различаются как по количеству используемых в обработке видеокadres, так и по методам их обработки. Помимо методов обработки видеокadres, некоторые их реализации включают в себя новые алгоритмы формирования сигналов для получения изображений в активно-импульсных телевизионных измерительных системах. Также представлены результаты моделирования двухзонного и многозонного методов измерения дальности и произведена экспериментальная оценка их точности.

**Ключевые слова:** активная зона видения, моделирование, обработка видеокadres, электронно-оптический преобразователь, стробируемый прием, развертка по дальности.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-7-14

Дистанционное измерение дальности является важной и практически значимой проблемой в современных технологиях позиционирования объектов в пространстве. Для решения подобных задач применяются различные методы и средства, которые позволяют определять расстояние до наблюдаемого объекта в заданных условиях с требуемой точностью.

Зная дистанцию до наблюдаемого объекта в каждой точке его плоского изображения, можно формировать его трехмерную модель, при помощи которой возможно определение таких параметров объекта, как линейные размеры и его скорость перемещения в пространстве.

В связи с решением ряда конкретных задач большое внимание уделяется разработке систем, использующих активный метод определения дистанции до объектов. К таким системам относятся активно-импульсные телевизионные измерительные системы (АИ ТИС), обычно применяющиеся для обнаружения и распознавания объектов в сложных условиях видения (СУВ) благодаря возможности подавления помехи обратного рассеяния [1]. Также за счет своих конструктивных особенностей и принципов работы АИ ТИС позволяют определять дистанцию до наблюдаемых объектов [2]. Видеосистемы, работа которых основана на стробировании во времени источника оптического излучения и фотоприемного устройства, имеют широкое применение в различных областях промышленности. К примеру, такие системы, основанные на стробировании, могут быть использованы для навигации транспортных средств в СУВ. Они могут обнаружить опасность на дороге раньше водителя и меньше подвержены влиянию условий освещения, неблагоприятной погоды или других активных систем, используемых в автомобилях [3, 4].

Подсвет пространства короткими оптическими импульсами, а также стробируемый прием отраженного оптического сигнала спустя заданное время

являются основным принципом работы АИ ТИС. Формирование импульсов управления оптическим излучателем и фотоприемным устройством реализуют блоки управления и стробирования. В качестве источника оптических импульсов выступает импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ), работающий в ИК-диапазоне, а для импульсного приема отраженного оптического сигнала используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП) [5]. Известны другие конструктивные решения, основанные на работе активно-импульсного прибора без использования ЭОП с применением ПЗС-фотоприемника [6]. Данная технология позволяет улучшить массогабаритные параметры устройства и качество получаемых изображений [7], но при этом обладает меньшей чувствительностью, чем системы с использованием ЭОП.

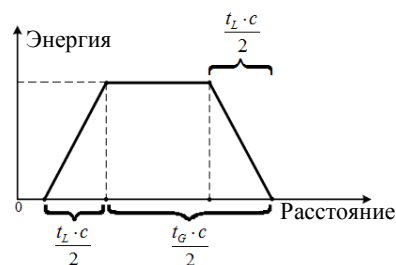


Рис. 1. Форма АЗВ для прямоугольных импульсов подсвета и стробирования ЭОП при  $t_L < t_G$

В основе способов определения дальности с помощью АИ ТИС используется определение активной зоны видения (АЗВ), представляющей собой видимую с помощью АИ ТИС область пространства. На рис. 1 представлена форма АЗВ, показывающая распределение энергии в зависимости от расстояния наблюдения и прозрачности среды, в которой распространяется излучение при прямоугольных импульсах подсвета и стробирования фотоприемника [8]. При этом АЗВ имеет характерные участки,



определяемые длительностью импульса подсвета  $t_L$  и длительностью импульса стробирования ЭОП  $t_G$ .

#### Методы определения дальности в АИ ТИС

Существуют различные методы определения расстояний, реализуемые активно-импульсными приборами. Одним из них является двухзонный метод измерения дальности (ДМИД), принцип измерения расстояния в котором основан на использовании двух АЗВ, сдвинутых по задержке стробирования на время длительности импульса подсвета. Причем в таком методе для получения линейной зависимости энергии от расстояния предполагается использование прямоугольных импульсов подсвета и стробирования фотоприемника одинаковой длительности, которые позволяют по нормированной разности амплитуд в первой и второй АЗВ измерить дальности до объектов наблюдения в поле зрения прибора.

С целью повышения точности измерения дальности двухзонным методом и возможности использования твердотельных лазеров с малыми длительностями оптических импульсов возможно выполнение внутрикадровой интеграции экспозиций фотоприемника для изменения формы измерительной АЗВ, как представлено в работе [9].

В известных методах определения расстояний с помощью АИ ТИС при использовании характерных точек или измерении калибровочных постоянных в [10] проводится исключительно с идеальными прямоугольными импульсами подсвета и стробирования ЭОП, что не учитывает погрешность измерения дистанции вследствие невозможности реализации таких импульсов на практике.

Известен способ измерения расстояний с использованием двухзонного метода путем нахождения отношения изображения второй зоны к сумме изображений первой и второй зон [11]. В [12] представлены два метода обработки изображений в лидарных системах, которые могут реконструировать трехмерную сцену из двух изображений.

Двухзонный метод измерения дальности имеет невысокую точность (из-за практической сложности реализации прямоугольных импульсов малой длительности), а также ограниченный динамический диапазон измерения дальности. При этом чем больше длительности импульсов подсвета и стробирования фотоприемника, тем больше диапазон измерения дальности, но в этом случае наблюдается существенно нелинейная взаимосвязь измеренных уровней видеосигнала со значениями дальности до объектов.

Многозонный метод определения дальности (ММИД) предполагает интеграцию экспозиций фотоприемного устройства, что позволяет в широких пределах регулировать динамический диапазон определения расстояний без изменения длительности импульса подсвета.

Метод многоимпульсной подсветки искусственного космического объекта, основанный на использовании матрицы прибора с зарядовой связью в режиме сверхмалого времени накопления, представлен в [13]. Метод дает возможность оперативно-

го высокоточного измерения углового разрешения (0,25 угл. мин), дальности до цели (100–2000 м) и построения «карты глубины» пространства. Моделирование показало, что погрешность измерений на малых дистанциях не превышает 20 мм, а на дистанции 2 000 м не превышает 160 мм.

Применение технологии трехмерной визуализации с помощью flash-лидаров используется для выполнения миссий НАСА [14]. Для реализации данной технологии требуется большая частота излучения лазерных импульсов, чтобы покрыть область, в которой находится наблюдаемый объект, и создать изображение с достаточным разрешением. К недостаткам технологии можно отнести низкое разрешение по глубине, связанное с длительностью излучаемого импульса, и высокую мощность источника лазерного излучения. Однако это решение является перспективным для построения системы трехмерной визуализации [15].

Многозонный метод может эффективно использоваться на разных типах фотоприемников. Линейная зависимость энергии от расстояния может быть также получена при использовании модуляции амплитуды импульса стробирования фотоприемника.

Преимуществом данного метода является больший (относительно двухзонного метода) динамический диапазон измерения расстояний, который будет зависеть от длительности импульса стробирования фотоприемника.

Далее будет проведен сравнительный анализ моделей двухзонного и многозонного методов.

#### Моделирование двухзонного и многозонного методов определения дальности в АИ ТИС. Двухзонный метод

Моделирование ДМИД предполагает первым этапом формирование характерных АЗВ, получаемых путем свертки формы оптического импульса источника подсвета с формой управляющего напряжения оптического затвора фотоприемника. Получение АЗВ можно представить в виде выражения

$$X_m = \sum_{k=1}^N L_k G_{m+k}, \quad (1)$$

где  $X_m$  – отсчеты АЗВ,  $N$  – число отсчетов формы оптического импульса,  $L_k$  – отсчеты формы оптического импульса,  $G_m$  – отсчеты формы управляющего напряжения оптического затвора фотоприемника.

Моделирование ДМИД проводилось для двух форм АЗВ, соответствующих сверткам идеализированной и квазиреальной форм оптических импульсов.

При этом задержка стробирования первой АЗВ составила 40 нс, а второй – 140 нс. Длительности оптического импульса и импульса напряжения оптического затвора фотоприемника составляли 100 нс.

Идеализированный оптический импульс представляет собой прямоугольный импульс заданной длительности с бесконечно коротким временем нарастания и спада. Модели АЗВ при идеализированных прямоугольных импульсах подсвета и стробирования ЭОП представлены на рис. 2.

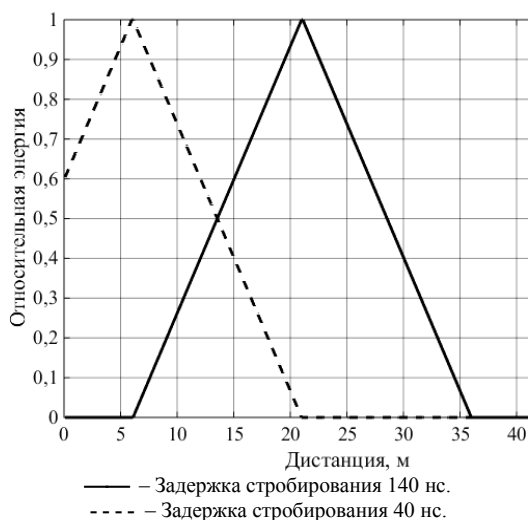


Рис. 2. Модели АЗВ при идеализированных прямоугольных импульсах подсвета и стробирования ЭОП

Квазиреальный импульс представляет собой модель реального оптического импульса решетки лазерных диодов Л-13, форма импульса представлена на рис. 3.

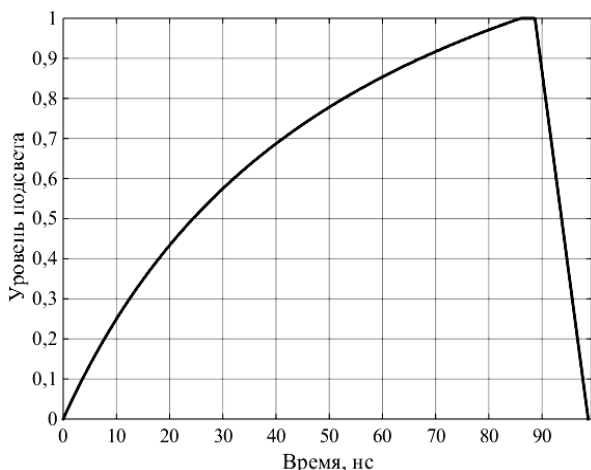


Рис. 3. Форма квазиреального импульса подсвета

На рис. 4 представлены модели АЗВ при квазиреальных импульсах подсвета и стробирования ЭОП.

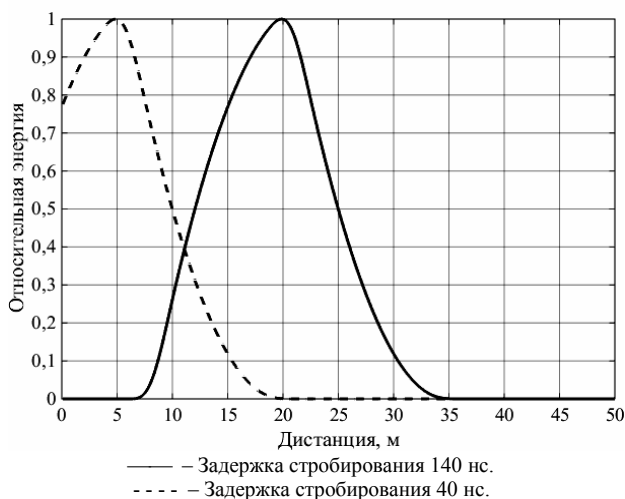


Рис. 4. Модели АЗВ при квазиреальных импульсах подсвета и стробирования ЭОП

Формирование кривой развертки по дальности, описывающей распределение энергии в зависимости от расстояния до предполагаемого объекта наблюдения, происходит путем взвешивания энергий пересекающихся участков двух смещенных АЗВ и описывается следующим выражением:

$$Y_n = \frac{X_{2n}}{X_{2n} + X_{1n}} \cdot \frac{1}{2} \cdot c \cdot (\tau_L + \tau_{D_{x1}}), \quad (2)$$

где  $Y_n$  – отсчеты кривой развертки по дальности;  $X_{1n}$  – отсчеты заднего фронта первой АЗВ;  $X_{2n}$  – отсчеты переднего фронта второй АЗВ;  $c$  – скорость света;  $\tau_L$  – длительность оптического импульса;  $\tau_{D_{x1}}$  – длительность задержки стробирования первой АЗВ.

Полученные в результате моделирования ДМИД кривые развертки по дальности представлены на рис. 5.

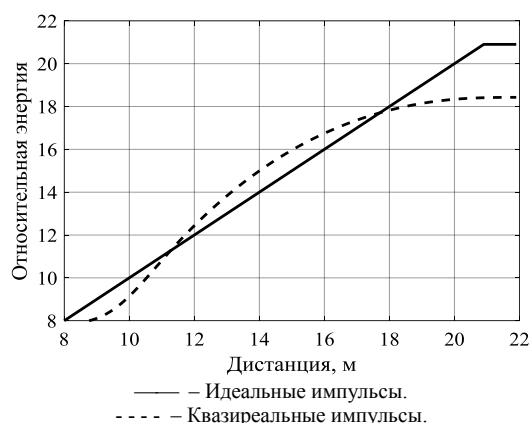


Рис. 5. Графики кривых развертки по дальности при идеальных и квазиреальных импульсах подсвета и стробирования ЭОП

Оценка потенциальной точности определения дальности по ДМИД выполняется путем вычисления разности между линейной кривой развертки по дальности для модели с идеальными управляющими импульсами и аналогичной кривой из модели с квазиреальными управляющими импульсами. Полученный в результате график ошибки линейности кривой развертки по дальности представлен на рис. 6.

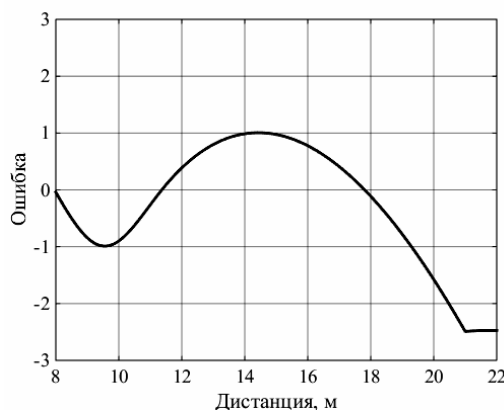


Рис. 6. График ошибки линейности кривой развертки по дальности для случая с квазиреальными импульсами

Из графиков на рис. 5 и 6 видно, что при сложной форме оптического импульса (см. рис. 3) кривая развёртки по дальности имеет нелинейную зависимость уровня принимаемой энергии от расстояния наблюдения, при этом по результатам моделирования погрешность определения расстояния составляет 1 м.

#### Многозонный метод

Предлагается рассмотреть многозонный метод измерения дальности (ММИД), который позволит расширить диапазон и повысить точность измерения дальности.

Моделирование ММИД предполагает формирование множества характерных АЗВ, получаемых путем свертки формы оптического импульса источника подсвета с формой управляющего напряжения оптического затвора фотоприёмника согласно выражению (1). Кривая развёртки по дальности в ММИД может быть описана следующим выражением:

$$Y_m = \frac{\sum_{n=1}^N X_{n_m}}{X_{1_m}}, \quad (3)$$

где  $Y_m$  – отсчеты кривой развёртки по дальности;  $N$  – количество АЗВ;  $X_{n_m}$  – отсчеты АЗВ, а  $X_{1_m}$  – АЗВ с максимальной глубиной и минимальной задержкой стробирования.

Моделирование ММИД приводится для девяти сдвинутых в пространстве и перекрывающихся АЗВ разной глубины. При этом шаг увеличения задержки стробирования для каждой последующей зоны составляет 15 нс, длительность последующей зоны также сокращалась на 15 нс. Длительность импульса подсвета была постоянной и составляла 30 нс, форма импульса подсвета квазиреальная и имеет передний фронт длительностью 24 нс, вершину импульса 3 нс, задний фронт 3 нс. Длительность импульса стробирования ЭОП для первой зоны равна 160 нс, фронты импульса стробирования по 15 нс, вершина импульса 130 нс.

На рис. 7 представлено взаимное расположение моделей девяти АЗВ в ММИД.

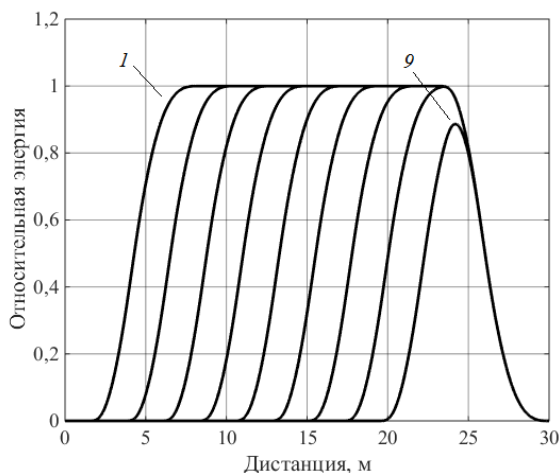


Рис. 7. Модели девяти АЗВ при квазиреальных импульсах подсвета и стробирования ЭОП с шагом по задержке стробирования 15 нс и шагом по длительности ЭОП 15 нс

Полученная в результате моделирования ММИД кривая развёртки по дальности представлена на рис. 8.

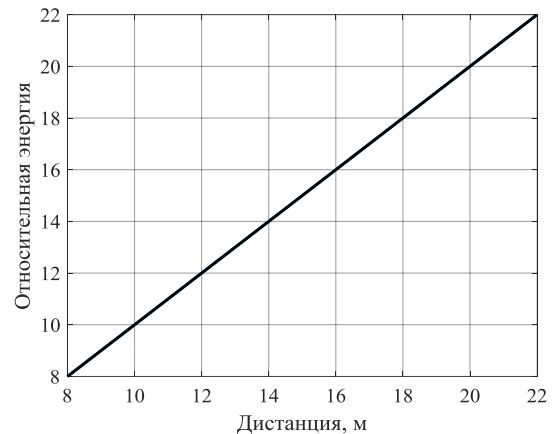


Рис. 8. График кривой развёртки по дальности для ММИД при девяти АЗВ

Оценка потенциальной точности определения дальности по ММИД выполняется путем вычисления разности между идеальной линейной кривой и кривой, полученной в результате моделирования.

Полученный в результате график ошибки линейности кривой развёртки по дальности представлен на рис. 9.

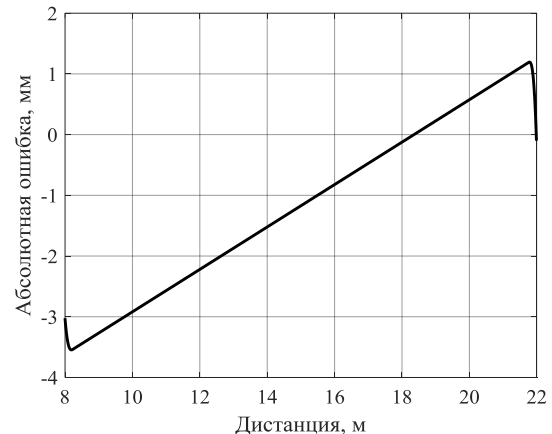


Рис. 9. График абсолютной ошибки линейности кривой развёртки по дальности для ММИД при девяти АЗВ

Из графиков на рис. 8 и 9 видно, что даже при сложной форме оптического импульса (см. рис. 3) кривая развёртки по дальности при девяти АЗВ имеет явно выраженную линейную зависимость уровня принимаемой энергии от расстояния наблюдения, при этом по результатам моделирования погрешность определения расстояния не превышает 4 мм.

Также представляет интерес зависимость ошибки линейности развёртки по дальности от количества АЗВ. В таблице представлены результаты такого моделирования.

Из таблицы видно, что при увеличении количества АЗВ в ММИД абсолютная ошибка определения дальности уменьшается, и уже при количестве АЗВ, равном девяти, составляет единицы миллиметров.

При этом очевидно, что дальнейшее увеличение количества АЗВ при использовании ММИД в реальной системе нецелесообразно, поскольку уже ее аппаратные погрешности будут определять реальную погрешность определения дальности.

**Результаты моделирования зависимости ошибки линейности от количества АЗВ для многозонного метода определения дальности**

Количество АЗВ	Максимальное значение ошибки, ± м	Среднеквадратичное значение ошибки, м
2	+2 / -3	1,4
3	+1 / -1,5	0,71
4	+0,4 / -0,6	0,31
5	+0,15 / -0,3	0,13
6	+0,07 / -0,2	0,059
7	+0,05 / -0,05	0,03
8	+0,02 / -0,08	0,013
9	+0,0015 / -0,004	0,0014
10	+0,001 / -0,003	0,0011

Для сравнения двух методов определения дальности, а именно ДМИД и ММИД между собой, был проведен эксперимент на базе лабораторного макета АИ ТИС, разработанного в ТУСУРе.

В качестве трассы наблюдения использовался коридор протяженностью 25 м и шириной 1,5 м, в котором были установлены в качестве объектов наблюдения транспаранты на дистанциях: 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 и 22 м. Транспарант представляет собой лист белой бумаги с нанесенной на нем цифрой, означающей расстояние до него.

При проверке ДМИД необходимо получить два кадра: первый, содержащий АЗВ с начальной задержкой стробирования, равной 40 нс, и второй, содержащий АЗВ с задержкой стробирования, равной сумме длительности сигнала подсвета и начальной задержки стробирования, а именно 140 нс.

Из полученных кадров изображений, согласно выражению (2), можно получить изображение трассы в котором уровень средней яркости наблюдаемых объектов будет зависеть от их расстояния до макета системы. Полученное изображение будет содержать так называемую измерительную АЗВ, отсчеты которой и будут определять кривую развертки по дальности.

На рис. 10 представлено полученное в результате эксперимента с ДМИД изображение, содержащее измерительную АЗВ.



Рис. 10. Изображение, содержащее измерительную АЗВ, в эксперименте ДМИД

По отсчетам измерительной АЗВ, изображенной на рис. 10, была получена кривая развертки по дальности, которая приведена на рис. 11, совместно с ранее полученными результатами моделирования.

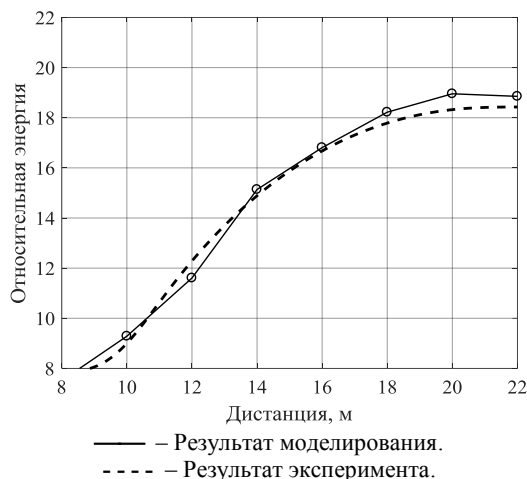


Рис. 11. Совместный график кривых развёрток по дальности моделей и эксперимента ДМИД

Оценка потенциальной точности определения дальности по ДМИД выполняется путем вычисления разности между идеальной линейной кривой и кривой полученной в результате эксперимента, и составила в среднем 1 м.

При проведении эксперимента ММИД, согласно выражению (3), необходимо получение изображения кадра, содержащего сумму нескольких АЗВ, для этого необходимо выполнить поочередную видеосъемку транспарантов при изменении задержки стробирования ЭОП от 40 до 150 нс с шагом 15 нс при изменении длительности импульса стробирования ЭОП от 150 до 40 нс, при этом длительность импульса подсвета равна 30 нс.

Далее производится сложение полученных видеок кадров, и результат суммы девяти АЗВ приведен на рис. 12.

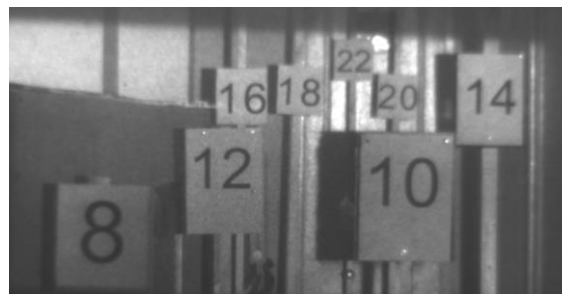


Рис. 12. Изображения кадра суммы девяти АЗВ

Для получения изображения с измерительной АЗВ, а также кривой развертки по дальности, согласно выражению (3), необходимо найти отношение изображения кадра, содержащего сумму девяти АЗВ (см. рис. 12), к изображению кадра, содержащему наиболее протяженную (первую) из девяти АЗВ. На рис. 13 приведено изображение кадра отношения сумм девяти АЗВ к первой АЗВ, т.е. содержащее измерительную АЗВ.

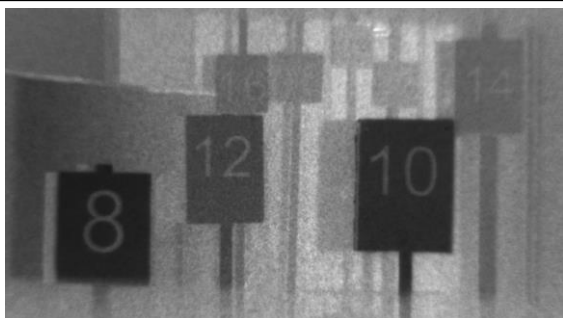


Рис. 13. Изображение, содержащее измерительную АЗВ, в эксперименте ММИД

По значениям средней яркости на транспарантах в кадре, содержащем измерительную АЗВ, можно построить кривую развертки по дальности, которая изображена на рис. 14 совместно с результатами моделирования для эксперимента с ММИД (9 АЗВ).

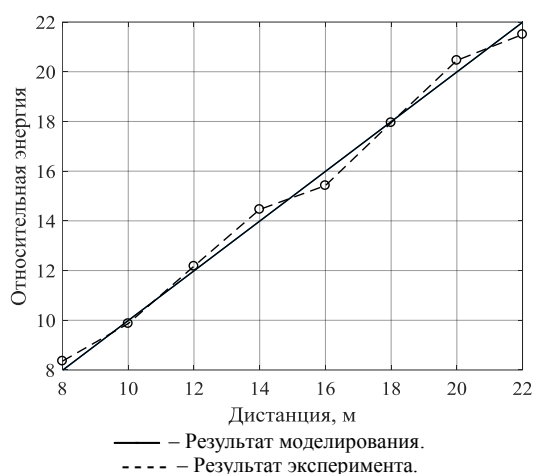


Рис. 14. Совместный график кривых развёрток по дальности модели и эксперимента для ММИД (9 АЗВ)

Оценка потенциальной точности определения дальности по ММИД выполняется путем вычисления разности между идеальной линейной кривой и кривой полученной в результате эксперимента, и составила в среднем 0,4 м.

#### Заключение

По результатам проведенного моделирования и эксперимента по исследованию точности ММИД и ДМИД можно сделать следующие выводы.

Способ измерения дальности в АИ ТИС ДМИД имеют невысокую точность и ограниченный диапазон измерения дальности и требует для этого большую длительность импульса подсвета (десятки или сотни нс), при этом погрешность измерения дальности в ДМИД по результатам моделирования в среднем составила 1 м в случае с квазиреальной формой импульса подсвета в диапазоне измерений от 8 до 22 м. По результатам проведенного эксперимента можно сделать вывод о том, что реальная погрешность измерения дальности в АИ ТИС с использованием ДМИД составляет 1 м в диапазоне измерения от 8 до 22 м, что совпадает с результатами моделирования.

В случае использования ММИД длительность импульса подсвета может иметь малую величину (единицы или десятки нс), при этом не оказывая влияния на динамический диапазон определения дальности. Таким образом, ММИД существенно расширяет динамический диапазон измерения дальности и уменьшает погрешность ее оценки. Погрешность измерения дальности в ММИД (девять АЗВ) по результатам моделирования в среднем составила 1,4 мм при диапазоне измерений от 8 до 22 м.

В ДМИД и ММИД наблюдается независимость влияния закона обратных квадратов на результаты измерения дальности до объектов.

По результатам проведенного эксперимента можно сделать вывод о том, что погрешность измерения дальности в АИ ТИС с использованием ММИД (девять зон) составляет 0,4 м в диапазоне измерения от 8 до 22 м. Отклонения экспериментальных результатов от результатов моделирования ММИД вызваны, с одной стороны, особенностями лабораторного макета АИ ТИС, а именно процесса преобразования изображения в ЭОП, работающего в импульсном режиме с малыми временами стробирования, с другой стороны, влиянием джиттера длительности импульсов подсвета и стробирования фотоприемника. В данном случае для лабораторного макета АИ ТИС джиттер длительностей импульсов составлял не более 1 нс, что при пересчете в дальность составляет 0,15 м.

Также отклонения экспериментальных результатов от результатов моделирования вызваны особенностями трассы наблюдения, заключающимися в ее пространственном ограничении, что не исключает появление переотраженных оптических импульсов излучателя в АИ ТИС.

Дальнейшее совершенствование ММИД в АИ ТИС с большим количеством АЗВ и их реализацией параллельно в пределах одного кадра формирования изображения позволит разработать прецизионные системы реального времени по созданию «карты глубин» наблюдаемого пространства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по научному проекту № 19-37-90141.

#### Литература

1. Experimental Estimation of Frequency-Contrast Characteristics of Active Pulsed Television Systems under Conditions of Enhanced Turbidity of Aerosol Media / V.V. Belov, Y.V. Gridnev, V.V. Kapustin, V.S. Kozlov, A.N. Kudryavtsev, M.I. Kuryachy, A.K. Movchan, R.F. Rakhimov, M.V. Panchenko, V.P. Shmargunov // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2019. – Vol. 32, no. 1. – P. 103–107.
2. Statistical Analysis and Experimental Evaluation of Active-Pulse Television Measuring Systems Vision Zone Shapes / A. Movchan, V. Kapustin, M. Kuryachiy, E. Chaldina // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1488. – P. 012006.
3. A global shutter sensor used in active gated imaging for automotive / A. Lahav, A. Lahav, A. Birman, D. Perhest, A. Fenigstein, Y. Grauer, E. Levi // Proc. IISW. – 2015. – P. 1–4.

4. Grauer Y. Active gated imaging in driver assistance system // *Advanced Optical Technologies*. – 2014. – Vol. 3, no. 2. – P. 151–160.

5. Волков В.Г. Лазерные полупроводниковые излучатели для приборов ночного видения // *Полупроводниковая светотехника*. – 2012. – № 1. – С. 45–50.

6. Портативный активно-импульсный прибор наблюдения / Д.В. Алантьев, А.А. Голицын, А.В. Голицын, Н.А. Сейфи // *Изв. высш. учеб. завед. России. Приборостроение*. – 2018. – Т. 61, № 6. – С. 507–510.

7. Голицын А.А. Активно-импульсный метод наблюдения с использованием ПЗС-фотоприемника со строчным переносом / А.А. Голицын, Н.А. Сейфи // *Изв. высш. учеб. завед. России. Приборостроение*. – 2017. – Т. 60, № 11. – С. 1040–1046.

8. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы для обеспечения навигации транспортных средств в сложных метеоусловиях / В.В. Капустин, А.К. Мовчан, Е.В. Зайцева, М.И. Курячий // *Транспортные системы и технологии*. – 2018 – Т. 4, № 1. – С. 68–83.

9. Xinwei W. Multi-pulse time delay integration method for flexible 3D super-resolution range-gated imaging / W. Xinwei., L. Youfu, Z. Yan // *Optics express*. – 2015. – Vol. 23, No. 6. – P. 7820–7831.

10. Активно-импульсные системы видения и алгоритмы определения расстояний до объектов / В.А. Горобец, В.В. Кабанов, В.П. Кабачников, Б.Ф. Кунцевич, Н.С. Метельская, Д.В. Шабров // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2014. – Т. 81, № 2. – С. 283–291.

11. Basler [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.baslerweb.com/en/sales-support/downloads/document-downloads/time-of-flight-cameras/>, свободный (дата обращения: 13.03.2020).

12. Three-dimensional range-gated flash LIDAR for land surface remote sensing / X. Wang, Y. Cao, W. Cui, X. Liu, S. Fan, Y. Zhou, Y. Li // *Land Surface Remote Sensing II. – International Society for Optics and Photonics*. – 2014. – Vol. 9260. – P. 92604L.

13. Денисов А.В. Построение трехмерного образа искусственного космического объекта методом лазерной локации / А.В. Денисов, Д.А. Капитонов, А.С. Курников // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2019. – Т. 19, № 5. – С. 783–789.

14. Imaging flash lidar for autonomous safe landing and spacecraft proximity operation / F. Amzajerdian, V.E. Roback, A. Bulyshev, P.F. Brewster, G.D. Hines // *AIAA SPACE 2016*. – 2016. – P. 5591.

15. 3D imaging method based on CCD in the ultra-small integration time mode / P. Baranov, A. Tsytulin, A. Kurnikov, A. Chrnogubov // *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), IEEE*. – 2019. – P. 0725–0728.

#### Мовчан Андрей Кириллович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID 0000-0002-0020-6354  
Тел.: +7-923-421-94-41  
Эл. почта: mr.movchann@mail.ru

#### Капустин Вячеслав Валериевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID 0000-0002-2293-0511  
Тел.: +7-960-969-88-77  
Эл. почта: peregnun@mail.ru

#### Курячий Михаил Иванович

Канд. техн. наук, с.н.с., доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID 0000-0002-3970-5644  
Тел.: +7-913-829-90-14  
Эл. почта: kur@tu.tusur.ru

#### Чалдина Елизавета Сергеевна

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-950-272-30-10  
Эл. почта: elizaveta\_chaldina@mail.ru

Movchan A.K., Kapustin V.V., Kuryachy M.I., Chaldina E.S.

#### Methods and algorithms for precision distance measurement by active-pulse television measuring systems

The paper discusses methods for measuring the distance to objects using active-pulse television measuring systems. The methods considered in this paper are more based on the processing of obtained video frames using active-pulse systems; however these methods are different in the number of video frames used in processing and in the approaches of their processing. In addition to methods for processing video frames, some of their implementations include new signal generation algorithms for acquiring images in active-pulse television measurement systems. The results of modeling two-zone and multi-zone range measurement methods are also presented, and their accuracy is experimentally evaluated.

**Keywords:** active vision area, modeling, video frames processing, image intensifier tube, gated reception, scan by range.  
**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-7-14

#### References

1. Belov V.V., Gridnev Y.V., Kapustin V.V., Kozlov V.S., Kudryavtsev A.N., Kuryachy M.I., Movchan A.K., Rakhimov R.F., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. Experimental Estimation of Frequency-Contrast Characteristics of Active Pulsed Television Systems under Conditions of Enhanced Turbidity of Aerosol Media *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2019, vol. 32, no. 1, pp. 103–107.

2. Movchan A., Kapustin V., Kuryachiy M., Chaldina E. Statistical Analysis and Experimental Evaluation of Active-Pulse Television Measuring Systems Vision Zone Shapes *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1488, P. 012006.

3. Lahav A., Birman A., Perhest D., Fenigstein A., Grauer Y., Levi E. A global shutter sensor used in active gated imaging for automotive. *In Proc. IISW*, 2015, P. 1-4.

4. Grauer Y. Active gated imaging in driver assistance system *Advanced Optical Technologies*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 151–160.

5. Volkov V.G. [Laser semiconductor emitters for night vision devices]. *Semiconductor lighting technology*, 2012, no. 1, pp. 45–50 (in Russ.).

6. Alentev D.V., Golitsyn A.A., Golitsyn A.V., Seifi N.A. *Portativnyy aktivno-impul'snyy pribor nablyudeniya* [Portable active-pulse surveillance device]. *News of higher educational*

institutions of Russia. *Instrumentation*, 2018, vol. 61, no. 6, pp. 507–510 (in Russ.).

7. Golitsyn A.A., Seyfi N.A. *Aktivno-impulsnyy metod nablyudeniya s ispolzovaniyem PZS-fotopriyemnika so strochnym perenosom* [Active-pulse observation method using a CCD photodetector with horizontal transfer]. News of higher educational institutions of Russia. *Instrumentation*, 2017, vol. 60, no. 11, pp. 1040–1046 (in Russ.).

8. Kapustin V.V., Movchan A.K., Zaitseva E.V., Kuryachy M.I. *Aktivno-impulsnyye televizionnyye izmeritelnyye sistemy dlya obespecheniya navigatsii transportnykh sredstv v slozhnykh meteousloviyakh* [Active-pulse television measuring systems for ensuring navigation of vehicles in difficult weather conditions]. *Transport systems and technologies*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 68–83 (in Russ.).

9. Xinwei W., Youfu L., Yan Z. Multi-pulse time delay integration method for flexible 3D super-resolution range-gated imaging *Optics Express*, 2015, vol. T. 23, no. 6, pp. 7820–7831.

10. Gorobets V.A., Kabanov V.V., Kabashnikov V.P., Kuntsevich B.F., Metelskaya N.S., Shabrov D.V. *Aktivno-impulsnyye sistemy videniya i algoritmy opredeleniya rastoyaniy do obyektov* [Active-impulse vision systems and algorithms for determining distances to objects]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2014, vol. 81, no. 2, pp. 283–291 (in Russ.).

11. Basler. Available at: <https://www.baslerweb.com/en/sales-support/downloads/document-downloads/time-of-flight-cameras/> (Accessed: March 13, 2020).

12. Wang X., Cao Y., Cui W., Liu X., Fan S., Zhou Y., Li Y. Three-dimensional range-gated flash LIDAR for land surface remote sensing, *Land Surface Remote Sensing II* Vol. 92604L. International Society for Optics and Photonics, 2014, p. 92604C.

13. Denisov A.V., Kapitonov D.A., Kurnikov A.S. *Postroyeniye trekhmernogo obraza iskusstvennogo kosmicheskogo obyektmetodom lazernoy lokatsii* [The construction of a three-dimensional image of an artificial space object by laser ranging]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 783–789 (in Russ.).

14. Amzajerdian F., Roback V.E., Bulyshev A., Brewster P.F., Hines G.D. Imaging flash lidar for autonomous safe

landing and spacecraft proximity operation *AIAA SPACE 2016*, 2016, p. 5591.

15. Baranov P., Tsytulin A., Kurnikov A., Chrnogubov A. 3D imaging method based on CCD in the ultra-small integration time mode *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), IEEE*, Russia, Tomsk, 2019, pp. 0725–0728.

---

#### Andrey K. Movchan

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID 0000-0002-0020-6354  
Phone: +7-923-421-94-41  
Email: mr.movchann@mail.ru

#### Vyacheslav V. Kapustin

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor, Department of Television and Control, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID 0000-0002-2293-0511  
Phone: +7-960-969-88-77  
Email: peregnun@mail.ru

#### Mihail I. Kuryachiy

Doctor of Engineering Sciences, Senior researcher, Assistant Professor, Department of Television and Control, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID 0000-0002-3970-5644  
Phone: +7-913-829-90-14  
Email: kur@tu.tusur.ru

#### Elizaveta S. Chaldina

Undergraduate student, Department of Radio Engineering Systems, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-950-272-30-10  
Email: elizaveta\_chaldina@mail.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И ИНФОРМАТИКА**





УДК 004.056:519.1

А.О. Авсентьев, А.Г. Кругов, Ю.П. Перова

## Функциональные модели защиты информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений объектов информатизации

Рассматривается подход к построению функциональных моделей защиты информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений структурных элементов объектов информатизации, учитывающий динамику параллельно реализуемых процессов перехвата нарушителем этой информации и ее защиты легитимными пользователями от перехвата в условиях применения адаптивных мер защиты, основанный на стратифицированном представлении совокупностей действий, выполняемых при реализации этих процессов.

**Ключевые слова:** функциональная модель, свойства информации, ценность информации, технический канал утечки информации, адаптивные меры защиты информации, электрические характеристики радиоэлектронных устройств, побочные электромагнитные излучения, условия согласования разнородных характеристик.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-17-35

Объект информатизации (ОИ) в соответствии с его определением, приведенным в [1], может рассматриваться как организационно-техническая система, обеспечивающая процесс передачи, приема, обработки и хранения информации с использованием информационных систем (ИС) как на основе различного рода технических средств, в том числе на основе средств вычислительной техники, так и без использования таких средств в выделенных помещениях. Такие ОИ широко применяются в различных государственных, коммерческих и других структурах. Циркулирующая в их ИС информация может представлять интерес для многих заинтересованных сторон. В этих условиях все более востребованным на практике становится обеспечение безопасности этой информации от угроз нарушения ее конфиденциальности, целостности и доступности.

При этом одной из основных угроз является утечка информации за счет перехвата нарушителем информативных сигналов побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ) от основных технических средств и систем (ОТСС) ОИ, приводящая к нарушению ее конфиденциальности [2]. Обеспечение эффективного противодействия угрозам утечки информации ОИ за счет ПЭМИ связано с необходимостью тщательного анализа характеристик структурных элементов (СЭ) объектов и возможностей реализации нарушителем противоправных действий по перехвату информативных сигналов ПЭМИ в условиях ограниченных возможностей применяемых мер защиты информации [3].

В настоящее время в документах государственных регуляторов отсутствуют требования к ОИ рассматриваемого типа в части защиты информации от утечки за счет ПЭМИ. Действующие нормативные документы ФСТЭК России регламентируют требования к ИС в целом или к АИС на основе СВТ. В этих требованиях не учитываются особенности СЭ ОИ и динамика реализации нарушителем противоправных действий по перехвату информативных сигналов ПЭМИ. В частности, в них не учитывается динамика

реализации нарушителем процессов перехвата информации по техническим каналам ее утечки (ТКУИ) в рамках реализуемой стратегии технической разведки (ТР), включающей выбор технического средства разведки (ТСР) и места его применения. Учет указанной динамики может не только существенно повлиять на защищенность информации от утечки, но и изменить требования по защите.

Однако для такого учета необходимы математические модели, учитывающие как динамику реализации процессов передачи, приема и обработки информации на ОИ различного типа, так и динамику выполнения нарушителем противоправных действий по ее перехвату. До настоящего времени такие модели для ОИ рассматриваемого типа не разрабатывались, а существующие математические модели защиты информации не учитывают особенностей функционирования различных ОИ и динамику реализации указанных информационных процессов.

С учетом изложенного данная статья, посвященная разработке вербальных и функциональных моделей защиты информации от утечки за счет ПЭМИ СЭ ОИ как средств первичной формализации исследуемых процессов в условиях динамики их реализации, в интересах построения математических моделей оценки защищенности информации ОИ от утечки является актуальной.

### Общее описание реализации процессов передачи информации на ОИ и ее перехвата за счет ПЭМИ РЭУ ОИ

Важным аспектом развития методологии оценки защищенности информации ОИ от утечки по техническим каналам за счет ПЭМИ СЭ ОИ является то, что в соответствии с описаниями как канала передачи информации между легитимными пользователями, так и ТКУИ [4], называемыми в [5] основным и побочным, соответственно, эти каналы представляют собой совокупность источника, получателя информации и среды распространения информационного / информативного сигнала. Основное отличие этих каналов состоит в противоположности целей их реализации [5]. При этом обеспечение свойств информации,

как передаваемой, так и перехватываемой по основному и побочному каналам, соответственно, зависит с одной стороны, от электрических характеристик используемых сигналов как материальных носителей этой информации, с другой – от характеристик СЭ соответствующих каналов. Обеспечение свойств передаваемой / перехватываемой информации определяется степенью согласования этих СЭ между собой [6]. Условия согласования указанных характеристик в каналах различного назначения существенно отличаются. По своей сути они представляют собой совокупность действий, выполняемых во времени последовательно-параллельно при наличии разнообразных логических условий их выполнения [7]. Описание этапов такого рода действий может быть получено лишь в результате функционального и аналитического моделирования. При этом функциональные модели рассматриваются как средство первичной формализации в интересах построения аналитических моделей оценки вероятностно-временных характеристик процессов реализации каналов утечки и защиты информации от утечки.

Используемое в настоящее время методическое обеспечение оценки защищенности информации от утечки по техническим каналам, возникающим за счет ПЭМИ СЭ ОИ, не позволяет обеспечить адекватность математического представления исследуемых процессов на ОИ и как следствие в полной мере применить аппарат математического моделирования для решения задач оценки и повышения защищенности информации от утечки по каналам рассматриваемого типа [8].

В [7] предложен подход к формированию вербальных и функциональных моделей процессов реализации ТКУИ рассматриваемого типа в условиях динамики выполнения нарушителем соответствующих противоправных действий. Однако в этих моделях не учитываются возможности выполнения легитимными пользователями действий по реализации мер защиты информации от утечки в этих условиях. Случайный характер временных характеристик информационных процессов (ИПр), реализуемых легитимными пользователями, и процессов перехвата информации (ПрПИ), реализуемых нарушителем за счет ПЭМИ, обуславливает необходимость реализации легитимными пользователями соответствующих мер защиты.

В соответствии с действующим в настоящее время подходом к обеспечению защиты информации ИС предъявляются требования, утвержденные приказом ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. № 17 [3].

В соответствии с этим нормативным документом на ОИ должна быть предусмотрена защита информации, представленной в виде информативных электрических сигналов и физических полей, т.е. ее защита от утечки по ТКУИ за счет ПЭМИ. Однако в базовом наборе мер защиты информации, используемом в качестве основы для выбора этих мер, для установленного класса защищенности ОИ предусмотрены меры организационно-режимного характера и

не предусмотрены меры защиты информации, обрабатываемой техническими средствами от утечки по техническим каналам.

В методическом документе ФСТЭК России «Меры защиты информации в государственных информационных системах» [9] указано, что защита информации от утечки по техническим каналам должна осуществляться в соответствии со специальными требованиями и рекомендациями по технической защите конфиденциальной информации [2], а также в соответствии с иными методическими документами ФСТЭК России по защите информации в государственных информационных системах от утечки по техническим каналам. При этом должны учитываться структурно-функциональные характеристики ОИ, режимы обработки информации на ОИ и в его отдельных элементах, а также иные характеристики ОИ, применяемые информационные технологии и особенности его функционирования.

Следует отметить, что в [2] лишь декларируются требования к защите конфиденциальной информации и приводятся некоторые рекомендации по их выполнению («как должно быть»), в основном с использованием мер организационно-режимного характера.

Вместе с тем в соответствии с современным подходом к защите информации меры защиты выбираются предварительно на этапе проектирования и разработки ОИ, а применяются эти меры на этапе эксплуатации без учета динамики реализации ТКУИ, возникающих за счет ПЭМИ СЭ ОИ. Это обусловлено использованием в качестве методического обеспечения такого выбора инструментально-расчетных методик для оценки защищенности информации от утечки по ТКУИ рассматриваемого типа. В качестве показателя для такой оценки в этих методиках используются измеренные значения отношения сигнал / шум и рассчитанные на основе этих измерений размеры контролируемой зоны (КЗ) вокруг объекта [10]. Как показано в [11], использование этих методик не позволяет достаточно точно оценить защищенность информации от утечки. При этом учитываются только энергетические характеристики информативного сигнала ПЭМИ и частично (в пределах КЗ) – характеристики среды его распространения и не учитываются характеристики других элементов описания ТКУИ – используемого разведывательного приемника, среды распространения перехватываемого сигнала ПЭМИ за пределами КЗ и тем более не учитываются возможности нарушителя по реализации различных вариантов стратегии применения технических средств разведки.

В соответствии с определением стратегии, приведенным в [12], перехват информации с использованием технических средств может осуществляться нарушителем [2]:

- из-за границы КЗ из близлежащих строений и транспортных средств;
- из смежных помещений, принадлежащих другим учреждениям (предприятиям) и расположенных в том же здании, что и объект защиты;

– при посещении учреждения (предприятия) посторонними лицами;

– за счет несанкционированного доступа (несанкционированных действий) к информации, циркулирующей в ИС, как с помощью технических средств ИС, так и через информационные сети общего пользования.

Для перехвата информации могут использоваться разнообразные технические средства, как портативные возимые и носимые, размещаемые вблизи объекта защиты либо подключаемые к каналам связи или техническим средствам обработки информации, так и стационарные, размещаемые в близлежащих строениях.

Нарушитель не имеет возможности воздействия на условия формирования ПЭМИ в пределах КЗ ОИ. Однако за пределами КЗ у него имеется множество вариантов выбора средств разведки в зависимости от условий их применения. При этом изменяются характеристики СЭ ТКУИ (среды распространения информативного сигнала, средств технической разведки). Эти изменения носят случайный характер [13, 14], и решение вопросов их учета в целях обеспечения защиты информации от утечки представляет достаточно сложную задачу.

Современное методическое обеспечение защиты информации от перехвата по техническим каналам, возникающим за счет ПЭМИ СЭ ОИ, не позволяет решить данную задачу. Это обусловлено особенностями функционирования ОИ, разнообразием номенклатуры и разнородностью радиоэлектронных устройств (РЭУ), используемых в составе ТС ОИ, а

также неопределенностью относительно действий нарушителя по реализации процесса ПрПИ перехвата информации по ТКУИ, СЭ которых могут иметь различные характеристики [15–18].

СЭ ОИ взаимосвязаны через их параметры и характеристики. Вид и значения этих параметров и характеристик в существенной степени определяются формой представления информации. В зависимости от формы представления информации при реализации информационных процессов используются элементы структуры ОИ, обеспечивающие выполнение этих требований [16, 17].

Указанные взаимосвязи представлены на рис. 1 [18].

В обобщенном виде функционирование ОИ рассматриваемого типа может быть представлено в виде совокупности множеств и процессов:

$$\Phi_{\text{ОИ}} = \{\mathbf{M}, \mathfrak{R}, \mathbf{Pr}, \text{ИПр}, \text{ПрПИ}, \text{ПрЗИ}\}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{M} = \{M_i, i = 1, 2, \dots, I\}$  – множество массивов различного вида информации, формируемых источником информации (ИИ);  $\mathfrak{R} = \{\rho_j, j = 1, 2, \dots, J\}$  – множество РЭУ в структуре ОТСС (на рис. 1 РЭУ  $\rho_j$  в общем виде обозначены как СЭ  $e_j$  основного канала связи ОИ, используемого для реализации процесса ИПр передачи информации на ОИ);  $\mathbf{Pr} = \{p_k, k = 1, 2, \dots, K\}$  – множество мер, применяемых для реализации процесса защиты информации (ПрЗИ).

Реализация указанных информационных процессов осуществляется в условиях многофакторных взаимосвязей разнородных РЭУ СЭ ОТСС из (1).

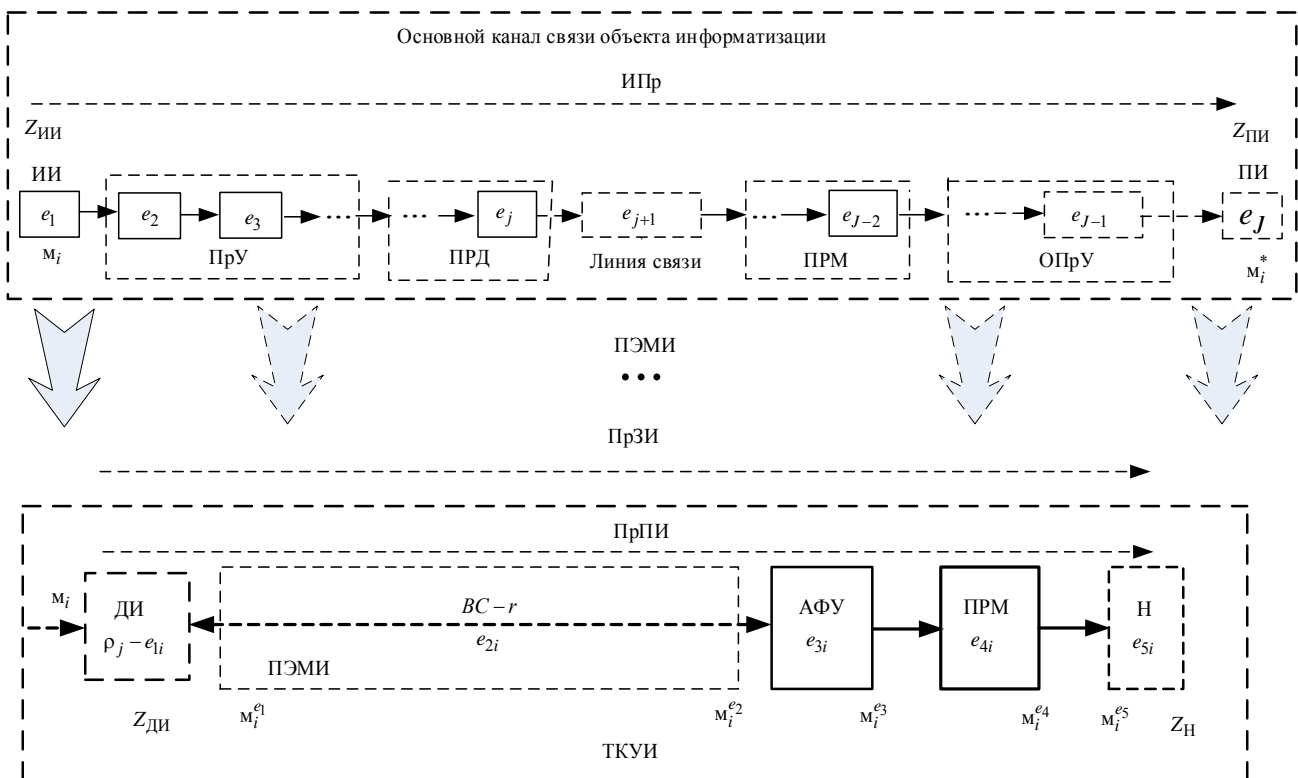


Рис. 1. Структурно-логическое представление процесса передачи информации на объекте информатизации и процесса ее перехвата за счет ПЭМИ радиоэлектронных устройств объекта

Так, ИПр информационный процесс может быть реализован при выборе в качестве СЭ ОИ РЭУ  $\{\rho_j\}_i$  из множества  $\mathfrak{R}$ , использование которых обеспечит выполнение условия  $Z_{\text{ПИ}} = Z_{\text{ПИ}}^{\text{ТР}}$  для массива информации  $m_i$ :

$$\text{ИПр} = \left\{ \begin{array}{l} m_i = \{\rho_j\}_i, \\ Z_{\text{ИИ}}, Z_{\text{ПИ}} \geq Z_{\text{ПИ}}^{\text{ТР}}, \end{array} \right\} \quad (2)$$

где  $Z_{\text{ИИ}}$  и  $Z_{\text{ПИ}}$  – показатели ценности информации, характеризующие ее основные свойства для отправителя и получателя соответственно,  $Z_{\text{ПИ}} = Z_{\text{ИИ}} \times K_0\{\rho_j\}_i$ ;  $K_0\{\rho_j\}_i$  – коэффициент передачи выбранной траектории  $\{\rho_j\}_i$  реализации ИПр;  $Z_{\text{ПИ}}^{\text{ТР}}$  – показатель ценности информации, удовлетворяющий требованиям получателя;  $\hat{=}$  – знак соответствия.

Соответствие  $m_i \hat{=} \{\rho_j\}_i$  означает выполнение условия [14]

$$V_{m_i} \leq C_{\{\rho_j\}_i}, \quad (3)$$

где  $V_{m_i} = A_{m_i} \times \Delta f_{m_i} \times \Delta \tau_{m_i}$  – объем информационного сигнала массива  $m_i$ ;  $A_{m_i}$ ,  $\Delta f_{m_i}$ ,  $\Delta \tau_{m_i}$  – амплитуда, ширина спектра частот и продолжительность передачи информационного сигнала этого массива соответственно;  $C_{\{\rho_j\}_i} = \mu_{\{\rho_j\}_i} \times \Delta F_{\{\rho_j\}_i} \times \Delta \tau_{\{\rho_j\}_i}$  – пропускная способность СЭ тракта передачи информации массива  $m_i$ ;  $\mu_{\{\rho_j\}_i}$ ,  $\Delta F_{\{\rho_j\}_i}$ ,  $\Delta \tau_{\{\rho_j\}_i}$  – чувствительность, полоса пропускания и время функционирования в заданном режиме РЭУ траектории реализации процесса ИПр передачи информации массива  $m_i$ .

Соответствие  $Z_{\text{ПИ}} = Z_{\text{ПИ}}^{\text{ТР}}$  означает выполнение условия [14]

$$V_{(\text{ПИ})_i} \geq V_{(\text{ПИ})_i}^{\text{ТР}}, \quad (4)$$

где  $V_{(\text{ПИ})_i}$  – объем информационного сигнала массива  $m_i$ , принимаемого получателем информации;  $V_{(\text{ПИ})_i}^{\text{ТР}}$  – объем информационного сигнала массива  $m_i$ , удовлетворяющий его требованиям.

Как показано в [16, 17], РЭУ из  $\{\rho_j\}_i$  используются в качестве преобразующих, передающих, приемных и обратных преобразующих устройств (ПрУ, ПРД, ПРМ и ОПрУ соответственно). При этом из этих РЭУ формируется необходимая траектория преобразований, а процесс ИПр реализуется по пути  $(e_1 \rightarrow e_2 \rightarrow \dots \rightarrow e_j)$ .

СЭ  $e_1 - e_j$  в рамках траектории взаимосвязаны. Их взаимосвязи осуществляются путем согласования выходных характеристик предыдущего с входными характеристиками последующего СЭ в выбранной

траектории [17]. Согласование обеспечивается в соответствии с условием (3). При этом в качестве выходных (сигнальных) характеристик рассматриваются амплитуда сигнала  $A_{e_{j-1}}^c$ ,  $j = 2, 3, \dots, J$ ,  $\Delta f_{e_{j-1}}^c$ , ширина его спектра, а также промежуток времени  $\Delta \tau_{e_{j-1}}^c$ , в течение которого значения этих характеристик соответствуют требованиям к свойствам передаваемой информации. В качестве входных (сигнальных) характеристик рассматриваются  $\mu_{e_j}^{\text{lin}}$  – чувствительность  $j$ -го СЭ к этим сигналам, его  $\Delta F_{e_j}^{\text{lin}}$  – полоса пропускания и промежуток времени  $\Delta \tau_{e_j}^{\text{lin}}$ , в течение которого обеспечивается согласование. В соответствии с условиями согласования, описанными в [7], в обобщенном виде реализация ИПр может быть представлена в виде:

$$V_{e_1}^{m_i} \hat{=} C_{e_2}^{\text{lin}} \rightarrow V_{e_2}^{m_i} \hat{=} C_{e_3}^{\text{lin}} \rightarrow \dots \rightarrow V_{e_{j-1}}^{m_i} \hat{=} C_{e_j}^{\text{lin}}. \quad (5)$$

В результате преобразований информационного сигнала на каждом из этапов  $e_1 - e_j$  изменяются его параметры, определяющие основные свойства передаваемой информации, характеризующие ее ценность для обеспечиваемой деятельности.

Каждое РЭУ из подмножества  $\{\rho_j\}_i$  может выступать в качестве источника ПЭМИ, как датчика информации в структуре ТКУИ, используемого нарушителем для реализации процесса ПрПИ перехвата информации массива  $m_i$ .

В соответствии с определением [4] ТКУИ может быть представлен в виде:

$$\text{ТКУИ} = \{\mathbf{M}, \mathfrak{R}_i, \mathbf{D}_j, \text{Int}_j\}, \quad (6)$$

где  $\mathfrak{R}_i = \{\rho_j\}_i$  – подмножество РЭУ из  $\mathfrak{R}$ , которые могут быть использованы в качестве ДИ в структуре ТКУИ;  $\mathbf{D}_j = \{d_{jm}, m = 1, 2, \dots, M\}$  – множество направлений распространения ПЭМИ  $j$ -го РЭУ ОИ, используемых для реализации процесса ПрПИ перехвата информации.

$\text{Int}_{ji} = \{\text{int}_{jiv}, v = 1, 2, \dots, V\}$  – подмножество разведывательных радиоприемников (РРП) из их множества  $\text{Int} = \{\text{int}_v, v = 1, 2, \dots, V\}$ , которые могут быть использованы для приема ПЭМИ  $j$ -го РЭУ, модулированных информационным сигналом массива  $m_i$ .

Процесс ПрПИ перехвата информации за счет ПЭМИ этих РЭУ может быть реализован при выполнении условий

$$\text{ПрПИ} = \left\{ \begin{array}{l} V_{m_i} \hat{=} V_{\rho_{ji}}^{\text{ПЭМИ}}, V_{\rho_{ji}}^{\text{ПЭМИ}} \hat{=} \text{int}_{vji}, \\ Z_{m_i}^* \hat{=} Z_{m_i}^{\text{ТР}*}, \end{array} \right\} \quad (7)$$

где  $V_{m_i} \hat{=} V_{\rho_{ji}}^{\text{ПЭМИ}}$  – условие возможности использования  $j$ -го РЭУ ОТСС ОИ в качестве источника (датчика) ПЭМИ, модулированных информационным

сигналом массива  $m_i$ ;  $V_{\rho ji}^{ПЭМИ}$  и  $V_{\rho ji}^{*ПЭМИ}$  – объемы сигналов ПЭМИ, модулированных информационным сигналом массива  $m_i$ , на выходе  $j$ -го РЭУ ОТСС ОИ и на входе  $\nu$ -го РРП, соответственно;

$$V_{\rho ji}^{*ПЭМИ} = V_{\rho ji}^{ПЭМИ} \times (1 - K_0(d_{jm}));$$

$K_0(d_{jm})$  – коэффициент ослабления ПЭМИ  $j$ -го РЭУ ОИ в  $m$ -м ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) направлении среды их распространения;  $V_{\rho ji}^{*ПЭМИ} \triangleq int_{jiv}$  – условие возможности использования  $\nu$ -го РРП для приема ПЭМИ этих РЭУ;  $Z_{m_iH}^* \triangleq Z_{m_iH}^{*TP}$  – условие выполнения требований нарушителя к свойствам перехватываемой информации,  $Z_{m_iH}^*$  – показатель ценности перехваченной нарушителем информации массива  $m_i$ , характеризующий ее основные свойства;  $Z_{m_iH}^{*TP}$  – показатель ценности перехваченной информации, удовлетворяющий требованиям нарушителя.

Вербальная модель ТКУИ, используемого для реализации процесса ПрПИ перехвата информации в условиях отсутствия мер защиты, описана в [7]. Графическая иллюстрация этой модели по аналогии с [7] приведена на рис. 1.

В соответствии с описанием из всего множества  $\mathfrak{R}$  РЭУ ОИ чувствительными к воздействию информационного сигнала массива  $m_i$  могут быть лишь РЭУ из подмножества  $\mathfrak{R}_i$  [19]. На выходе каждого РЭУ из  $\{\rho_j\}_i$  (СЭ  $e_{ji}$  на рис. 1) формируется ПЭМИ в виде отклика на входное воздействие с характеристиками

$$V_{\rho ji}^{ПЭМИ} = A_{\rho ji}^{ПЭМИ} \times \Delta f_{\rho ji}^{ПЭМИ} \times \Delta \tau_{\rho ji}^{ПЭМИ}, \quad (8)$$

где  $A_{\rho ji}^{ПЭМИ}$ ,  $\Delta f_{\rho ji}^{ПЭМИ}$ ,  $\Delta \tau_{\rho ji}^{ПЭМИ}$  – амплитуда, ширина спектра частот и промежуток времени, в течение которого СЭ  $\{\rho_j\}_i$  может использоваться в качестве ДИ соответственно.

Как показано в [20], диаграмма направленности ПЭМИ может отличаться от круговой. Нарушитель в процессе реализации ПрПИ выбирает направление максимального уровня ПЭМИ, обеспечивающего минимальное значение коэффициента их ослабления  $K_0(d_{jm})$ . Для этих целей используется РРП с характеристиками, соответствующими характеристикам перехватываемого сигнала ПЭМИ  $V_{\rho ji}^{*ПЭМИ}$ .

Таким образом, из множеств разнородных СЭ ТКУИ из (6) нарушитель формирует траекторию реализации ПрПИ с целью обеспечения согласования этих СЭ по аналогии с (5). В соответствии с условиями согласования, описанными в [7], в обобщенном виде реализация нарушителем ПрПИ может быть представлена в виде

$$V_{e_{1i}}^{\rho i} \triangleq C_{e_{2i}}^{lin} \rightarrow V_{e_{2i}} \triangleq C_{e_{3i}}^{lin} \rightarrow V_{e_{3i}} \triangleq C_{e_{4i}}^{lin} \rightarrow V_{e_{4i}} \triangleq C_{e_{5i}}^{lin}. \quad (9)$$

Динамика реализации процессов ИПр и ПрПИ характеризуется их временными характеристиками.

Поскольку ТКУИ рассматриваемого типа реализуются с использованием РРП без воздействия на средства реализации ИПр, то защите от утечки подлежит только информация, передаваемая по основному каналу связи на ОИ. В связи с этим динамика реализации процесса ИПр характеризуется временными характеристиками, определяющими продолжительность передачи информации на ОИ, такими как начало, окончание и промежуток времени передачи самой информации. При этом учитывается время передачи  $\Delta \tau_{m_i}$  при условии выполнения требований легитимных пользователей к свойствам передаваемой информации, характеризуемым амплитудой  $A_{m_i}$  и шириной спектра  $\Delta f_{m_i}$  сигнала как ее материального носителя на каждом из этапов преобразований [21]. Указанные характеристики носят случайный характер и отличаются для ОИ различного назначения.

Нарушитель при реализации процесса ПрПИ выполняет совокупность действий, связанных с обнаружением ПЭМИ [22], определением направления максимального уровня излучения, выбором РРП и настройкой режимов его работы с целью обеспечения требований к основным свойствам, характеризующим ценность перехватываемой информации. Эти действия направлены на выполнение условий (3) и (4) относительно ПЭМИ РЭУ ОИ на каждом этапе преобразований в процессе ПрПИ. Времена выполнения указанных действий носят случайный характер и зависят от множества различных факторов, описанных в [21]. В связи с этим далее при определении временных характеристик действий, составляющих содержание исследуемых процессов, будем учитывать средние значения этих времен ( $\bar{\tau}$ ).

### Общее описание мер защиты информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ

В соответствии с существующим методическим подходом защита информации на ОИ достигается проектно-архитектурными решениями, проведением организационных и технических мероприятий, а также выявлением портативных электронных устройств перехвата информации. Меры защиты информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ реализуются предварительно, и они не адаптированы к условиям динамики реализации нарушителем процесса ПрПИ. Следует отметить, что не всегда имеется возможность реализации проектно-архитектурных решений и указанных мероприятий в объеме, обеспечивающем требуемый уровень защищенности информации. Например, в условиях плотной городской застройки возникают трудности с выбором помещения, обеспечением необходимых размеров КЗ вокруг ОИ или с применением активных мер защиты информации, таких как пространственное зашумление СЭ объекта.

В этих условиях защита информации от утечки может быть обеспечена путем применения организационно-технических адаптивных мер защиты.

С целью выбора таких мер обратимся к структурно-логическому представлению основного и побочного каналов на рис. 1.

Выбор РЭУ ОИ ( $\rho_j$ ); для использования в качестве ДИ в структуре ТКУИ определяется их характеристиками, наиболее важными из которых являются [19]:

- чувствительность (отношение изменения выходного сигнала к изменению сигнала на его входе);
- разрешающая способность (точность преобразования);

- линейность (равномерность изменения выходного сигнала в зависимости от входного);

- инерционность или время отклика (время установления выходного сигнала в ответ на изменение входного);

- полоса частот (диапазон частот, в котором входное воздействие воспринимается преобразователем с допустимым уровнем отклика на выходе).

При этом амплитуда и спектр ПЭМИ на выходе ДИ зависят от амплитуды и спектра сигнала входного воздействия. В качестве мер защиты могут применяться технические решения по регулированию амплитуды сигнала и ограничению ширины его спектра в основном канале связи при условии обеспечения требований к свойствам информации, определяющим ее ценность для получателя. Эти технические решения могут быть реализованы предварительно на этапах проектирования и разработки ОИ. Однако если ограничение ширины спектра сигнала не влияет на динамику изменения спектральных характеристик ПЭМИ на выходе ДИ, то регулирование амплитуды сигнала  $A_{M_i}$  позволит обеспечить соответствующее регулирование амплитуды ПЭМИ  $A_{P_{ji}}^{ПЭМИ}$ .

При этом в качестве ограничения учитывается обеспечение заданных свойств передаваемой по основному каналу связи информации.

Регулирование амплитуды сигнала в основном канале может осуществляться как в автоматическом режиме, так и непосредственно перед реализацией процесса ИПР при настройке режима работы ТС ОИ.

Адаптационные методы повышения защищенности информации информационных систем известны [23]. Возможности их использования в рассматриваемых целях обусловлены избыточностью энергетики современных систем передачи информации при необходимости обеспечения требований легитимных пользователей к свойствам передаваемой информации, характеризующим ее ценность для обеспечиваемой деятельности.

Эффективность этих методов зависит от частоты передачи информационных сигналов на ОИ и соответственно от частоты ПЭМИ.

Так, в соответствии с действующими трехзонными расчетно-измерительными методиками для определения уровней напряжённости электрического (магнитного) поля используется рассчитанное значение коэффициента ослабления ПЭМИ  $K_0(r)$ :

$$E(r) = \left|_{r=R} E(r) \right|_{r=d} \cdot K_0(r), \quad (10)$$

$$H(r) = \left|_{r=R} H(r) \right|_{r=d} \cdot K_0(r), \quad (11)$$

где  $d$  – расстояние  $r$  до опорной (измерительной) точки в опасном направлении излучения.

Зависимости данного коэффициента от расстояния  $r$  для различных «зон» при типовом значении  $d = 1$  м определяются по формулам [24]:

$K_0(r) \gg 1/r^3$  – для ближней зоны при  $d < r \leq L_6$ , где  $L_6$  – условная граница между ближней и промежуточной зонами;  $K_0(r) \approx 1/r^2$  – для промежуточной зоны при  $L_6 < r \leq L_d$ , где  $L_d$  – условная граница между промежуточной и дальней зонами;  $K_0(r) \approx 1/r$  – для дальней зоны при  $r \geq L_d$ ,

$$L_6 = \lambda/2\pi, L_d = 6\lambda \text{ при } L_6 \geq d. \quad (12)$$

Из (12) видно, что с уменьшением длины волны ПЭМИ уменьшаются размеры соответствующих зон и соответственно изменяется вид зависимости коэффициента  $K_0(r)$  от расстояния  $r$ .

В [11] приведена точная формула для коэффициента ослабления ПЭМИ  $K_0(r)$  по электрическому и магнитному полю

$$K_{0E}(r) = K_{0H}(r) = \frac{d^3}{r^3} \sqrt{\frac{k^4 r^4 - k^2 r^2 + 1}{k^4 d^4 - k^2 d^2 + 1}}, \quad (13)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

В (13) зависимость  $K_0(r)$  от частоты излучения (волнового числа) представлена в явном виде.

Рассмотрим пример, приведенный в [21]. При передаче на ОИ речевой информации с использованием средств звукоусиления и колебаний электрического тока в аналоговом виде в качестве материального носителя этой информации существует опасность перехвата ПЭМИ этих средств уже в ближней зоне на расстоянии в несколько десятков метров.

Так, при коэффициенте усиления усилителя низкой частоты (УНЧ) на уровне 60 дБ и измеренном уровне ПЭМИ от него  $E(r)|_{r=1\text{м}} \approx 100$  мВ/м на расстоянии 50 м от источника ПЭМИ  $E(r)|_{r=50} \approx 0,8$  мкВ/м, что выше уровня чувствительности большинства РРП, и перехват такого рода информации становится возможным.

Ограничение коэффициента усиления УНЧ до уровня 40 дБ и измеренного уровня ПЭМИ от него до  $E(r)|_{r=1\text{м}} \approx 100$  мВ/м на расстоянии 50 м от источника ПЭМИ  $E(r)|_{r=50} \approx 0,8$  мкВ/м, что ниже уровня чувствительности этих РРП. При этом с целью обеспечения условий приема нарушителю необходимо уменьшить расстояние  $r$  до источника ПЭМИ. При  $r=25$  м  $E(r)|_{r=25} \approx 0,6$  мкВ/м. Для этих целей нарушителю потребуется дополнительное время  $\bar{\tau}_{pl}^{ext}$  на выбор места применения РРП с точки зрения скрытности и  $\bar{\tau}_{in}^{ext}$  на время сканирования частотного диапазона [7].

Уменьшение амплитуды ПЭМИ  $A_{P_{ji}}^{ПЭМИ}$  может

быть достигнуто также путем экранирования ТС ОИ. Однако это приводит к увеличению стоимости ТС ОИ.

Рассмотрим условия реализации нарушителем ПрПИ в соответствии со структурно-логическим представлением на рис. 1.

Будем считать, что нарушитель выполняет указанные выше действия на территории, прилегающей к КЗ ОИ. В связи с тем, что эти действия носят противоправный характер, легитимные пользователи могут применять меры защиты, направленные на их локализацию.

Поскольку указанные меры защиты направлены на локализацию противоправных действий нарушителя, выполняемых на прилегающей к КЗ ОИ территории, то временные характеристики этих мер рассмотрим относительно временных диаграмм реализации процессов ИПр и ПрПИ, приведенных в [7].

На рис. 2, а представлены временные диаграммы, иллюстрирующие повышение защищенности информации информационных систем от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ путем применения технических решений по ослаблению уровня ПЭМИ, а на рис. 2, б для сравнения приведены временные диаграммы процессов передачи информации на объекте информатизации и реализации ТКУИ при параллельном выполнении действий, обеспечивающих перехват информации, исследование которых проводилось в [7]. При этом по аналогии с [7] в течение времени  $\bar{\tau}_{(1)}$  нарушителем выполняются действия, направленные на обеспечение возможности регистрации ПЭМИ РЭУ ОИ с использованием применяемого для этих целей РРП:

$$(A_{ПЭМИ}/P_{ш}) \geq \mu_{РРП}, \tag{14}$$

где  $A_{ПЭМИ}/P_{ш}$  – отношение амплитуды ПЭМИ к уровню шума на входе РРП;  $\mu_{РРП}$  – чувствительность РРП.

В течение времени  $\bar{\tau}_{(2)}$  нарушителем выполняются действия, направленные на выполнение его требований к свойствам перехватываемой информации в соответствии с условиями:

$$\Delta F_{РРП} \geq \Delta f_{ПЭМИ}, \tag{15}$$

$$\Delta \tau_{РРП} \geq \Delta \tau_{ПЭМИ}, \tag{16}$$

где  $\Delta F_{РРП}$  и  $\Delta f_{ПЭМИ}$  – полоса пропускания используемого в ТКУИ РРП и ширина спектра перехватываемого сигнала ПЭМИ соответственно;  $\Delta \tau_{РРП}$  и  $\Delta \tau_{ПЭМИ}$  – время функционирования РРП в заданном режиме и время, в течение которого ПЭМИ могут использоваться в качестве материального носителя перехватываемой информации.

С учетом последовательного выполнения действий, составляющих время  $\bar{\tau}_{(1)}$ , запишем:

$$\bar{\tau}_{(1)} = \bar{\tau}_{pl} + \bar{\tau}_{ob}^{ext} + \bar{\tau}_{in} + \bar{\tau}_{in}^{ext} + \bar{\tau}_{dir} + \bar{\tau}_{cor}, \tag{17}$$

где  $\bar{\tau}_{pl}$ ,  $\bar{\tau}_{in}$ ,  $\bar{\tau}_{dir}$ ,  $\bar{\tau}_{cor}$  – средние времена выполнения нарушителем противоправных действий, определенных в [7];  $\bar{\tau}_{ob}^{ext}$ ,  $\bar{\tau}_{in}^{ext}$  – средние дополнительные времена выполнения действий по выбору места применения и сканирования частотного диапазона, обусловленные применением на ОИ технических решений по адаптивному регулированию уровня ПЭМИ.

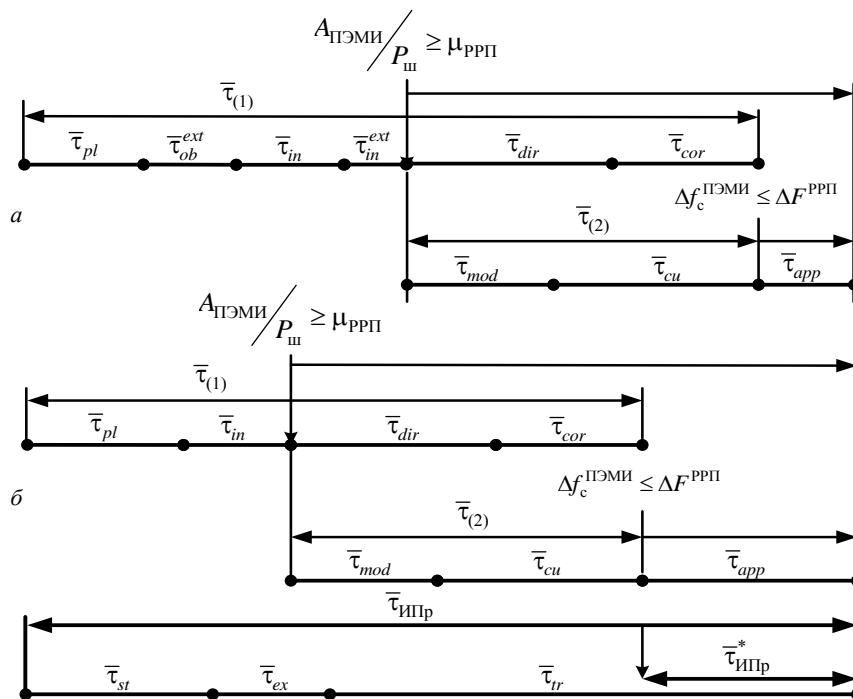


Рис. 2. Временные диаграммы повышения защищенности информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ путем применения технических решений по ослаблению уровня ПЭМИ при параллельном выполнении нарушителем действий, обеспечивающих реализацию процесса ПрПИ



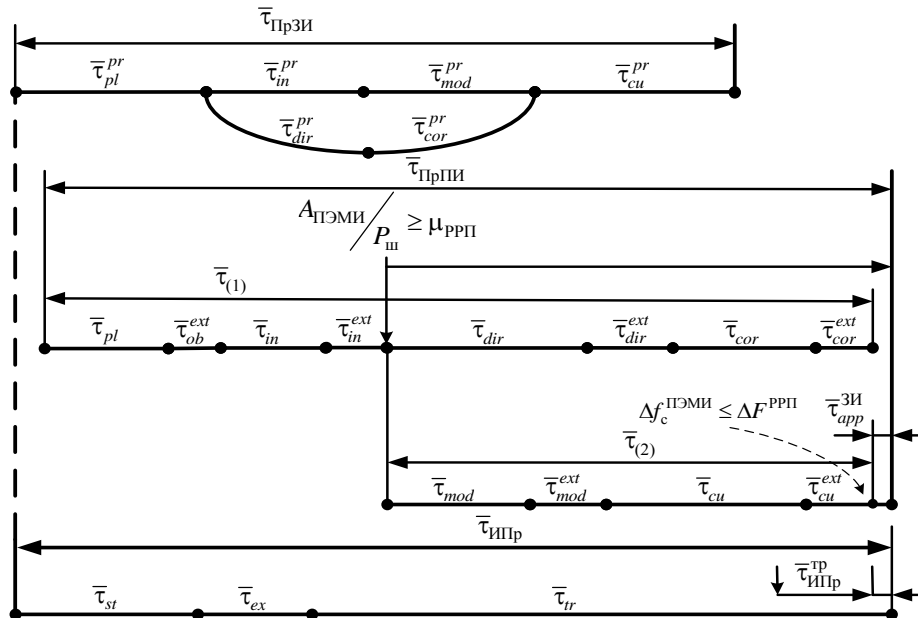


Рис. 3. Временные диаграммы адаптивных мер защиты по локализации действий нарушителя по реализации процесса перехвата информации за счет ПЭМИ радиоэлектронных устройств объекта информатизации

Содержание и времена выполнения нарушителем действий  $\bar{\tau}_{mod}$  выбора режима работы РРП и  $\bar{\tau}_{cu}$  настройки этого режима с учетом спектра сигнала ПЭМИ, составляющих время  $\bar{\tau}_{(2)}$ , а также среднее время применения РРП в режиме перехвата информации  $\bar{\tau}_{app}$  и условия успешной реализации ПрПИ аналогичны приведенным в [7].

Из рис. 2 видно, что технические решения, направленные на реализацию адаптивных методов повышения защищенности информации информационных систем, позволяют в некоторой степени увеличить время  $\bar{\tau}_{(1)}$  выполнения противоправных действий по реализации процесса ПрПИ и за счет этого соответственно несколько повысить защищенность этой информации. Однако следует отметить, что эффективность этих решений ограничена неопределенностью относительно большинства действий нарушителя на территории, прилегающей к КЗ ОИ.

На рис. 3 приведены временные диаграммы выполнения адаптивных мер защиты по локализации действий нарушителя, выполняемых им на различных этапах реализации процесса ПрПИ.

В качестве таких мер следует рассматривать меры организационно-технического характера, включающие совокупность действий, выполняемых легитимными пользователями на этапах подготовки информационной системы к передаче информации и непосредственно в процессе ее передачи как без использования, так и с использованием специальных технических средств. Указанные действия могут выполняться как в пределах КЗ ОИ, так и на прилегающей к этой зоне территории.

В пределах КЗ ОИ целью выполнения указанных действий является исключение возможности применения нарушителем для перехвата ПЭМИ РЭУ ОИ РРП путем контроля обстановки в соседних с этим

объектом помещениях. Объективная сторона возможности такого контроля заключается в наличии демаскирующих признаков действий нарушителя, применяющего РРП.

Демаскирующие признаки определяются возможностью использования в этих условиях нарушителем носимых или портативных РРП с техническими характеристиками, не позволяющими осуществлять перехват слабых и широкополосных сигналов в реальном масштабе времени.

К основным мерам рассматриваемого типа могут быть отнесены видеонаблюдение (в том числе с использованием технических средств), патрулирование прилегающей к помещению ОИ территории, радиоконтроль электромагнитной обстановки.

Поскольку эти меры реализуются в пределах КЗ ОИ, то продолжительность их реализации может соответствовать продолжительности реализации процесса ИПр, а для выполнения соответствующих действий могут привлекаться сотрудники штатных подразделений обеспечения безопасности объекта. В этих условиях противоправные действия нарушителя носят оперативный характер и в данной статье не рассматриваются.

В связи с тем, что за пределами КЗ ОИ территория возможного применения РРП с целью реализации перехвата информации за счет ПЭМИ РЭУ ОИ может быть достаточно обширной, а расстояния до источника ПЭМИ достаточно большими (десятки и сотни метров), нарушитель может применять для реализации ТКУИ более сложные и совершенные РРП, возимого (в салонах специально оборудованных автомобилей) или стационарного (в зданиях посольств, иностранных представительств, сторонних организаций) типа. В этих условиях целью применения мер защиты является локализация противоправных действий нарушителя на различных этапах реализации процесса ПрПИ.

На рис. 3 представлены временные диаграммы выполнения действий по реализации процесса ПрЗИ защиты речевой информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ, оборудованного средствами связи и звукоусиления, в условиях реализации нарушителем действий по перехвату этой информации в соответствии с временными диаграммами, приведенными в [7].

Поскольку действия легитимных пользователей в рамках реализации адаптивных мер защиты информации направлены на локализацию действий нарушителя, по аналогии с [7] обозначим  $\bar{\tau}_{pl}^{Pr}$ ,  $\bar{\tau}_{in}^{Pr}$ ,  $\bar{\tau}_{dir}^{Pr}$ ,  $\bar{\tau}_{cor}^{Pr}$  – временные характеристики мер, направленных на локализацию действий нарушителя по обеспечению условия (14), включающие времена: выбора места применения РПП, с точки зрения скрытности; сканирования частотного диапазона с целью обнаружения ПЭМИ РЭУ ОИ; определения направления максимального уровня излучения (диаграммы направленности АФУ ДИ); корректирования места применения РПП (с учетом расстояния  $r$ ), обеспечивающего выполнение условия (14);  $\bar{\tau}_{mod}^{Pr}$  и  $\bar{\tau}_{cu}^{Pr}$  – временные характеристики мер, направленных на локализацию действий нарушителя по обеспечению условия (15), включающие времена выбора режима работы РПП и настройки этого режима с учетом ширины спектра перехватываемого сигнала ПЭМИ.

Указанные действия по реализации мер защиты могут выполняться как последовательно, так и параллельно. Суммарное время их выполнения не превышает время реализации процесса ИПр на ОИ, а результатом является либо полное исключение возможности реализации нарушителем процесса ПрПИ, либо нарушение условий (7) и, в частности, нарушение условия обеспечения требований нарушителя к свойствам перехваченной информации  $Z_{M_iH}^* \triangleq Z_{M_iH}^{*TP}$ .

На рис. 3 это нарушение иллюстрировано условием  $\bar{\tau}_{app}^{ZI} < \bar{\tau}_{IPr}^{TP}$ , (18)

где  $\bar{\tau}_{IPr}^{TP}$  – часть информационного процесса, перехват информации в которой удовлетворяет требованиям нарушителя.

В качестве адаптивных мер защиты информации будем рассматривать:

– оперативное видеонаблюдение за территорией, прилегающей к КЗ ОИ, с использованием технических средств (или без их использования) с целью своевременного обнаружения действий нарушителя по выбору места применения РПП ( $\bar{\tau}_{pl}^{Pr}$ );

– патрулирование этой территории сотрудниками подразделений обеспечения безопасности объекта без применения и с применением портативных средств радиоконтроля с целью локализации действий нарушителя по выбору места применения РПП и обнаружения их ПЭМИ как демаскирующих признаков использования сканерных РПП ( $\bar{\tau}_{pl}^{Pr}$  и  $\bar{\tau}_{in}^{Pr}$ );

– применение мобильных (возимых или носимых) маломощных генераторов электромагнитного

шума или передающих устройств, имитирующих ПЭМИ РЭУ ОИ, с целью локализации действий нарушителя по определению направления максимального уровня излучения реальных ПЭМИ и корректированию места применения РПП (с учетом расстояния  $r$ ) ( $\bar{\tau}_{dir}^{Pr}$  и  $\bar{\tau}_{cor}^{Pr}$ );

– применение носимых маломощных передающих устройств, имитирующих ПЭМИ РЭУ ОИ, с целью локализации действий нарушителя по выбору режима работы применяемого им РПП и настройки этого режима ( $\bar{\tau}_{mod}^{Pr}$  и  $\bar{\tau}_{cu}^{Pr}$  и др.

Применение перечисленных мер направлено на обеспечение выполнения условия (18) за счет дополнительных временных затрат на выполнение нарушителем соответствующих действий:

$$\bar{\tau}_{ob}^{ext}, \bar{\tau}_{in}^{ext}, \bar{\tau}_{dir}^{ext}, \bar{\tau}_{cor}^{ext}, \bar{\tau}_{mod}^{ext} \text{ и } \bar{\tau}_{cu}^{ext}.$$

В соответствии с рис. 3 в качестве времени реализации процесса ПрЗИ следует рассматривать:

$$\bar{\tau}_{PrZI} = \max \begin{cases} \bar{\tau}_{pl}^{Pr} + \bar{\tau}_{in}^{Pr} + \bar{\tau}_{mod}^{Pr} + \bar{\tau}_{cu}^{Pr}, \\ \bar{\tau}_{pl}^{Pr} + \bar{\tau}_{dir}^{Pr} + \bar{\tau}_{cor}^{Pr} + \bar{\tau}_{cu}^{Pr}. \end{cases} \quad (19)$$

В связи с тем, что эти меры могут выполняться как последовательно, так и параллельно, то их выполнение целесообразно корректировать по времени в соответствии с действиями нарушителя, на локализацию которых они направлены.

В этих условиях защита информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ будет обеспечена при выполнении условия (18). Неформально это означает, что реализация адаптивных мер защиты информации направлена на обеспечение условий, при которых непосредственный перехват нарушителем этой информации (в течение времени  $\bar{\tau}_{app}^{ZI}$ ) может быть обеспечен только тогда, когда свойства информации, содержащейся в части перехваченного информационного процесса, не будут удовлетворять его требованиям  $\bar{\tau}_{IPr}^{TP}$ .

Значения временных характеристик действий по реализации указанных мер защиты информации случайны. В связи с этим при определении временных характеристик исследуемых процессов будем учитывать их средние значения, которые могут быть определены либо экспертным путем, либо с использованием сведений о характеристиках ТС, используемых для их выполнения.

В рассмотренной вербальной модели процесса защиты информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ могут быть учтены и другие традиционные меры, а также рассмотренные в данной статье технические решения.

В соответствии с временными диаграммами, приведенными на рис. 3, без изменения оставим среднее время реализации информационного процесса  $\bar{\tau}_{IPr} \approx 35$  мин.

В табл. 1 приведены примерные значения временных характеристик указанных мер защиты информации, а также дополнительные времена выполнения нарушителем действий по реализации ПрПИ

для ОИ, исследование характеристик которого проводилось в [7].

Среднее время реализации процесса ПрПИ для варианта, соответствующего параллельному выполнению нарушителем действий, в соответствии с временными диаграммами, приведенными на рис. 2, определим с учетом дополнительных времен, обусловленных применением на ОИ адаптивных мер защиты в соответствии с условием

$$\bar{\tau}_{\text{ПрПИ}} = \max \begin{cases} \bar{\tau}_{pl} + \bar{\tau}_{ob}^{ext} + \bar{\tau}_{in} + \bar{\tau}_{in}^{ext} + \bar{\tau}_{dir} + \bar{\tau}_{dir}^{ext}; \\ \bar{\tau}_{pl} + \bar{\tau}_{ob}^{ext} + \bar{\tau}_{in} + \bar{\tau}_{in}^{ext} + \bar{\tau}_{mod} + \bar{\tau}_{mod}^{ext}. \end{cases} \quad (20)$$

При этом с учетом [7] и данных табл. 1 получим  $\bar{\tau}_{\text{ПрПИ}} = \bar{\tau}_{pl} + \bar{\tau}_{ob}^{ext} + \bar{\tau}_{in} + \bar{\tau}_{in}^{ext} + \bar{\tau}_{dir} + \bar{\tau}_{cor} \approx 42$  мин.

Очевидно, что в этих условиях перехват информации нарушителем становится нереализованным  $\bar{\tau}_{\text{ИПр}} < \bar{\tau}_{\text{ПрПИ}}$  и ( $\bar{\tau}_{app} = 0$ ).

Таблица 1

**Временные характеристики действий, выполняемых при реализации процессов ПрЗИ и ПрПИ**

№ п/п	Название характеристики и ее обозначение	Способ определения	Минимальное значение, мин	Максимальное значение, мин	Среднее значение, мин
1	Время оперативного видеонаблюдения за территорией, прилегающей к КЗ ОИ, без использования ТС – $\tau_{pl}^{pr}$	Эксперт	4	6	5
2	Время патрулирования этой территории без применения средств радиоконтроля – $\tau_{pl}^{pr}$	Эксперт	5	7	6
3	Дополнительное время выбора нарушителем места применения РРП в условиях адаптивных мер защиты информации на ОИ – $\tau_{ob}^{ext}$	Эксперт	2	6	4
4	Дополнительное время выбора нарушителем места применения РРП – $\tau_{pl}^{ext}$	Эксперт	5	7	6
5	Время патрулирования этой территории с применением средств радиоконтроля – $\tau_m^{pr}$	Эксперт. Характеристики РРП	4	6	5
6	Дополнительное время работы РРП в режиме сканирования по частоте в связи с применением адаптивных мер защиты информации на ОИ – $\tau_{in}^{ext}$	Эксперт	3	5	4
7	Дополнительное время работы РРП в режиме сканирования по частоте – $\tau_{in}^{ext}$	Эксперт. Характеристики РРП	4	6	5
8	Время видеонаблюдения с последующим применением мобильных генераторов шума – $\tau_{dir}^{pr}$	Регламент реализации ИПр	5	10	7,5
9	Дополнительное время определения нарушителем направления максимального уровня излучения ПЭМИ – $\tau_{dir}^{ext}$	Регламент реализации ИПр	5	10	7,5
10	Время видеонаблюдения с последующим применением мобильных устройств имитации ПЭМИ – $\tau_{cor}^{pr}$	Регламент реализации ИПр	5	10	7,5
11	Дополнительное время корректирования нарушителем места применения РРП – $\tau_{cor}^{ext}$	Регламент реализации ИПр	5	10	7,5
12	Время применения носимых устройств, имитирующих ПЭМИ РЭУ ОИ, – $\tau_{mod}^{pr}$	Характеристики устройств, имитирующих ПЭМИ	8	12	10
13	Дополнительное время выбора нарушителем режима работы РРП для перехвата реальных ПЭМИ – $\tau_{mod}^{ext}$	Характеристики РРП	1	2	1,5
14	Время применения носимых устройств, имитирующих ПЭМИ РЭУ ОИ, модулированных тестовым информационным сигналом – $\tau_{ci}^{pr}$	Характеристики устройств, имитирующих ПЭМИ	8	12	10
15	Дополнительное время настройки РРП в выбранном режиме – $\tau_{ci}^{ext}$	Характеристики РРП	2	3	2,5
16	Время реализации перехвата информации в условиях мер защиты – $\tau_{app}^{ЗИ}$	Эксперт	1	2	1,5
17	Часть информационного процесса, перехват информации в которой удовлетворяет требованиям нарушителя, – $\tau_{\text{ИПр}}^{pr}$	Эксперт	4	6	5

Рассмотрим применение мер защиты в соответствии с временными диаграммами, приведенными на рис. 3.

При условии согласованного выполнения действий по реализации различных мер защиты информации в (19) среднее время реализации процесса ПрЗИ защиты информации составит

$$\bar{\tau}_{\text{ПрЗИ}} = \max \left\{ \begin{array}{l} 5+5+10+10 \\ 5+7,5+7,5+10 \end{array} \right. \approx 30 \text{ мин.}$$

При этом среднее время реализации нарушителем процесса ПрПИ составит:

$$\bar{\tau}_{\text{ПрПИ}} = \max \left\{ \begin{array}{l} \bar{\tau}_{pl} + \bar{\tau}_{ob}^{ext} + \bar{\tau}_{in} + \bar{\tau}_{in}^{ext} + \bar{\tau}_{dir}^{ext} + \bar{\tau}_{cor} + \bar{\tau}_{cor}^{ext} \approx 56 \text{ мин,} \\ \bar{\tau}_{pl} + \bar{\tau}_{ob}^{ext} + \bar{\tau}_{in} + \bar{\tau}_{in}^{ext} + \bar{\tau}_{mod} + \bar{\tau}_{mod}^{ext} + \bar{\tau}_{cu} + \bar{\tau}_{cu}^{ext} \approx 51 \text{ мин,} \end{array} \right.$$

т.е.  $\bar{\tau}_{\text{ПрПИ}} \approx 56$  мин.

Такое время реализации нарушителем процесса ПрПИ также не удовлетворяет его требованиям, так как заведомо не выполняется условие (18).

Особенности реализации процессов, временные диаграммы которых приведены на рис. 2 и 3, обусловлены следующими обстоятельствами:

- исследуемые процессы могут реализовываться параллельно и независимо один от другого;
- значения времен выполнения различных действий при их реализации случайны;
- при реализации каждого процесса составляющие его действия могут выполняться как последовательно, так и параллельно;
- результатом выполнения действий является обеспечение (или необеспечение) некоторых условий (например, (14)–(16), (18));
- для различных ОИ как состав, так и последовательность выполняемых действий отличаются.

Приведенные временные диаграммы и описания исследуемых процессов дают лишь общее представление об условиях их реализации. Однако они могут послужить основой для разработки функциональных и аналитических моделей в интересах оценки защищенности информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ на ОИ. При этом для различных ОИ соответствующие функциональные и аналитические модели также будут отличаться.

#### **Функциональные модели защиты информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений радиоэлектронных устройств объектов информатизации**

Для оценки защищенности информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ для конкретного ОИ в условиях отсутствия и применения мер защиты с учетом временного фактора необходимо определить времена выполнения действий, составляющих процессы, представленные на рис. 2 и 3, и последовательности их выполнения. Такие исследования ранее не проводились, а соответствующие модели не разрабатывались. Функциональные модели процессов защиты информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ также не разрабатывались.

В данной работе предложен подход к разработке таких моделей, по аналогии с [7] основанный на стра-

тифицированном представлении исследуемых процессов, с учетом особенностей их реализации на различных уровнях (этапах) и наличия связей между ними, в соответствии с условиями (14)–(16) и (18) [25] (рис. 4).

В соответствии с таким представлением каждый из исследуемых процессов (ИПр, ПрПИ, ПрЗИ) реализуется в несколько этапов (страт). Каждая из страт представляет собой совокупность различных действий, выполняемых легитимными пользователями или нарушителем. Количество страт для различных процессов может отличаться. При этом действия на первой и конечной стратах выполняются при реализации всех процессов. Действия на некоторых промежуточных стратах для различных процессов в зависимости от условий их реализации могут не выполняться, и соответствующая страта пропускается. В этих условиях обеспечивается возможность представления взаимосвязей между действиями, выполняемыми не только на разных стратах, но и для различных параллельно реализуемых процессов, что позволяет в соответствии со сформированным в данной работе вербальным описанием их реализации по аналогии с [7, 26, 27] сформировать совокупность таких действий, выполняемых как параллельно, так и последовательно, для различных вариантов обеспечения защиты информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ. С учетом указанных взаимосвязей при выполнении действий на всех стратах описания моделируемых процессов создаются условия для формирования их функциональных моделей.

В качестве примера рассмотрим варианты реализации процессов ИПр, ПрПИ и ПрЗИ, представленные на рис. 3, с учетом исследований, проведенных в [7].

Первая страта функционального описания исследуемых процессов представляет собой совокупность действий, характеризующих настройку ТС ОИ в заданном режиме (время  $\bar{\tau}_{st}$  в процессе ИПр), выбор нарушителем места применения РРП (время  $\bar{\tau}_{pl}$  в процессе ПрПИ) и применение легитимными пользователями мер по оперативному наблюдению за территорией, прилегающей к КЗ ОИ и / или патрулирование этой территории без применения ТС или с применением средств радиоконтроля (время  $\bar{\tau}_{pl}^{pr}$  в процессе ПрЗИ). Поскольку по окончании настройки ТС ОИ в заданном режиме возможно формирование ПЭМИ их РЭУ, и нарушитель имеет возможность выполнять соответствующие действия по реализации ПрПИ в то время, когда процесс непосредственной передачи информации еще не начинался, то на второй страте могут отсутствовать действия, связанные с реализацией процесса ИПр.

При этом вторая страта включает совокупность действий, связанных с корректированием нарушителем места применения РРП (дополнительное время  $\bar{\tau}_{ob}^{ext}$ ), при условии применения легитимными пользователями мер защиты, выполненных на первой страте (время  $\bar{\tau}_{pl}^{pr}$ ).

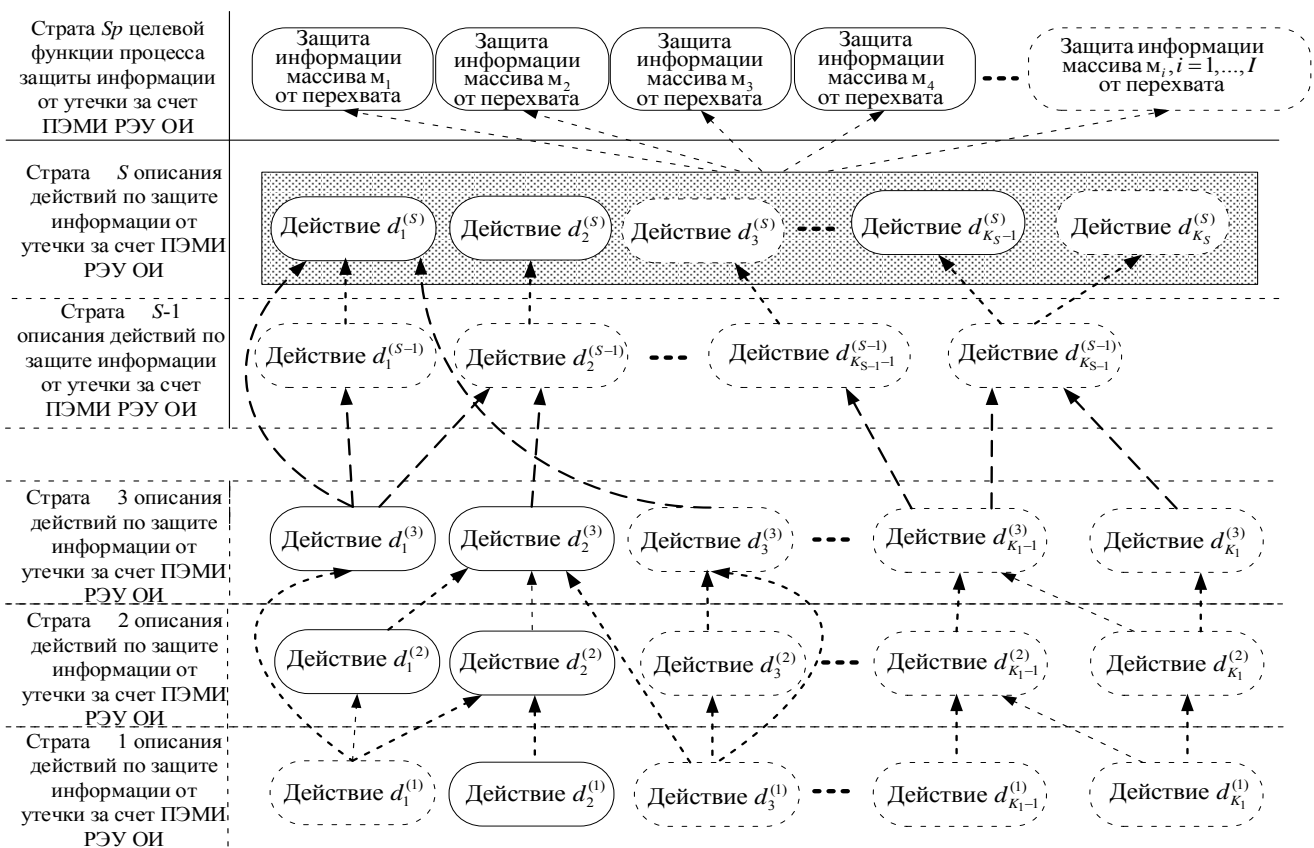


Рис. 4. Иллюстрация стратифицированного описания процесса защиты информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений радиоэлектронных устройств объекта информатизации

Страта 3 содержит действия по ожиданию передачи информации в процессе ИПр (время  $\bar{\tau}_{ex}$ ), по сканированию нарушителем частотного диапазона с использованием РРП ( $\bar{\tau}_{in}$ ), по применению легитимными пользователями средств радиоконтроля для обнаружения демаскирующих признаков работы РРП в режиме сканирования частотного диапазона (время  $\bar{\tau}_{in}^{pr}$ ).

На последующих промежуточных стратах функционального описания исследуемых процессов выполняются в тесной взаимосвязи действия по реализации процессов ПрПИ и ПрЗИ нарушителем и легитимными пользователями соответственно.

Указанные действия характеризуются временными характеристиками, приведенными в табл. 1. При этом дополнительные времена выполнения нарушителем ряда действий обусловлены применением легитимными пользователями мер организационно-технического характера, направленных на их локализацию. В табл. 1 эти обстоятельства обозначены соответствием нижних и отличием верхних индексов в обозначениях времен, характеризующих соответствующие действия.

Так, оперативное видеонаблюдение за территорией, прилегающей к КЗ ОИ, выполняемое легитимными пользователями без использования ТС и характеризуемое временем  $\bar{\tau}_{pl}^{pr}$ , вынуждает нарушителя к выбору места применения РРП, обеспечивающего

скрытность, что, в свою очередь, приводит к необходимости увеличения времени выполнения этого действия –  $\bar{\tau}_{ob}^{ext}$ . Патрулирование этой территории с применением средств радиоконтроля, характеризуемое временем  $\bar{\tau}_{in}^{pr}$ , обуславливает увеличение времени выполнения нарушителем действий по применению РРП в режиме сканирования частотного диапазона с целью обнаружения ПЭМИ –  $\bar{\tau}_{in}^{ext}$ . Оперативное видеонаблюдение, осуществляемое из автотранспорта, с последующим применением мобильных генераторов шума (время  $\bar{\tau}_{dir}^{pr}$ ) приводит к увеличению времени выполнения нарушителем действий по определению направления максимального уровня излучения ПЭМИ ( $\bar{\tau}_{dir}^{ext}$ ). Аналогичное обоснование имеют и другие последующие действия легитимных пользователей и нарушителя, временные характеристики которых приведены в табл. 1.

При этом действия легитимных пользователей могут либо опережать соответствующие действия нарушителя, либо выполняться с ними параллельно.

Совокупности указанных действий определяют взаимосвязи реализации процессов передачи информации на ОИ, ее перехвата за счет ПЭМИ РЭУ этого объекта и защиты от утечки за счет выполнения адаптивных мер защиты.

В качестве примеров рассмотрим некоторые из возможных вариантов представления совокупностей

действий, выполняемых при реализации процесса защиты информации, передаваемой на ОИ в условиях адаптации к угрозам утечки этой информации за счет ПЭМИ РЭУ этого объекта, в соответствии с рис. 4.

Целевая функция  $d_2^{(Sp)}$  является результатом выполнения совокупности действий:

$$(d_1^{(3)} \& d_2^{(3)}) \rightarrow d_2^{(S-1)} \rightarrow d_2^{(S)} \rightarrow d_2^{(Sp)},$$

где действие  $d_1^{(3)}$  выполняется после  $d_1^{(1)}$ :  $d_1^{(1)} \rightarrow d_1^{(3)}$ ; действие  $d_2^{(3)}$  – результат выполнения совокупности действий:

$$\left( \left( d_1^{(1)} \rightarrow d_1^{(2)} \right) \& \left( \left( d_1^{(1)} \rightarrow d_2^{(1)} \right) \rightarrow d_2^{(2)} \right) \& d_3^{(1)} \right) \rightarrow d_2^{(3)}.$$

Целевая функция  $d_{m_i}^{(Sp)}$  является результатом выполнения совокупности действий:

$$\left( \left( d_{K_1-1}^{(3)} \& d_{K_1}^{(3)} \right) \rightarrow d_{K_{S-1}}^{(S-1)} \rightarrow d_{K_S}^{(S)} \rightarrow d_{m_i}^{(Sp)} \right),$$

где действия  $d_{K_1-1}^{(3)}$  и  $d_{K_1}^{(3)}$ , в свою очередь, представляются в виде совокупностей действий:

$$\left( \left( \left( d_{K_1-1}^{(1)} \& d_{K_1}^{(1)} \right) \rightarrow d_{K_1-1}^{(2)} \right) \& \left( d_{K_1}^{(1)} \rightarrow d_{K_1}^{(2)} \right) \right) \rightarrow d_{K_1-1}^{(3)};$$

$$\left( d_{K_1}^{(1)} \rightarrow d_{K_1}^{(2)} \right) \rightarrow d_{K_1}^{(3)}, \text{ соответственно.}$$

Приведенные совокупности действий при определенных условиях соответствуют иллюстрации параллельной реализации информационных процессов ПрЗИ, ПрПИ и ИПр, представленной на рис. 3.

Последовательно-параллельный характер выполнения совокупностей действий, характеризующих реализацию этих процессов, усложняет оценку общих времен их реализации. В соответствии с описаниями, приведенными выше, это усложняет оценку защищенности информации от утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ как оценку соотношений этих времен с учетом условия (18).

В интересах такой оценки в условиях параллельной реализации рассматриваемых процессов для каждого из них необходимо определить композиции возможных совокупностей действий, выполненных на предыдущих стратах описания, и направленных на создание условий для их реализации.

При этом формально функциональная модель параллельной реализации процессов ПрЗИ, ПрПИ и ИПр с учетом [7] может быть представлена как совокупность множеств

$$\Phi_{II} = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{D}_u^I, \mathbf{M}(\mathbf{D}_u^I), Y(\mathbf{D}_u^I), u^I = 1, \overline{U^I}; \\ \mathbf{D}_u^{II}, \mathbf{M}(\mathbf{D}_u^{II}), Y(\mathbf{D}_u^{II}), u^{II} = 1, \overline{U^{II}}; \\ \mathbf{D}_u^{III}, \mathbf{M}(\mathbf{D}_u^{III}), Y(\mathbf{D}_u^{III}), u^{III} = 1, \overline{U^{III}}, \end{array} \right\} \quad (21)$$

где  $\mathbf{D}_u^I$  – множество действий  $d_u^{(k^I)} \in \mathbf{D}_u^I, k^I = 1, K^I$ , выполняемых для реализации  $u^I$ -го варианта процесса ПрЗИ,  $K^I$  – мощность множества  $\mathbf{D}_u^I$ ;  $\mathbf{D}_u^{II}$  –

множество действий  $d_u^{(k^{II})} \in \mathbf{D}_u^{II}, k^{II} = 1, K^{II}$ , выполняемых для реализации  $u^{II}$ -го варианта ПрПИ;  $K^{II}$  – мощность множества  $\mathbf{D}_u^{II}$ ;  $\mathbf{D}_u^{III}$  – множество действий  $d_u^{(k^{III})} \in \mathbf{D}_u^{III}, k^{III} = 1, K^{III}$ , выполняемых для реализации  $u^{III}$ -го варианта ИПр,  $K^{III}$  – мощность множества  $\mathbf{D}_u^{III}$ ;  $\mathbf{M}(\mathbf{D}_u^I), \mathbf{M}(\mathbf{D}_u^{II})$  и  $\mathbf{M}(\mathbf{D}_u^{III})$  – матрицы взаимосвязей действий  $d_u^{(k^I)}, d_u^{(k^{II})}$  и  $d_u^{(k^{III})}$  соответственно, в порядке их выполнения;  $Y(\mathbf{D}_u^I), Y(\mathbf{D}_u^{II})$  и  $Y(\mathbf{D}_u^{III})$  – совокупности условий для выполнения действий из их множеств, при которых реализация варианта соответствующего процесса возможна.

Несмотря на параллельность и независимость реализации рассматриваемых процессов, они взаимосвязаны через их характеристики. Так, реализация процесса ПрПИ становится невозможной в условиях, когда информация на ОИ не передается. Время выполнения ряда действий в процессе ПрПИ увеличивается в условиях выполнения определенных действий процесса ПрЗИ.

С учетом указанных взаимосвязей и представления (21) могут быть разработаны функциональные модели параллельно реализуемых процессов ПрПИ перехвата информации за счет ПЭМИ РЭУ ОИ, информационного процесса ИПр и процесса ПрЗИ защиты этой информации. Эти модели должны включать как совокупности выполняемых нарушителем действий, связанных с согласованием разнородных характеристик сигналов ПЭМИ с соответствующими характеристиками РРП в ТКUI, так и действий, выполняемых легитимными пользователями в интересах нарушения условий согласования за счет адаптивных мер защиты информации. При разработке таких моделей следует учитывать взаимосвязи этих действий, условия их выполнения, а также примерные оценки времени выполнения.

В соответствии с указанным подходом на основе функциональных моделей реализации процесса ПрПИ перехвата речевой информации, циркулирующей в выделенном помещении, оборудованном средствами звукоусиления, разработанных в [7], на рис. 5 приведен вариант представления таких моделей с учетом выполнения легитимными пользователями рассмотренных выше адаптивных мер защиты этой информации от перехвата, соответствующий параллельному выполнению нарушителем действий по реализации процесса ПрПИ.

Обозначения и описания действий, выполняемых в ходе реализации моделируемых процессов, соответствуют данным, приведенным в табл. 1.

В обозначениях выполняемых действий верхние индексы соответствуют последовательности их выполнения в рамках соответствующего процесса, первая цифра нижнего индекса обозначает тип моделируемого процесса, вторая цифра соответствует виду защищаемой информации (например, массива  $m_2$ ).

В табл. 2 приведены описания этих действий с учетом последовательностей их выполнения и взаимосвязей моделируемых процессов.

В табл. 2 средние времена выполнения действий указаны на основании экспертных оценок и известных характеристик используемых РПП.

В соответствии с моделью, приведенной на рис. 5 и с учетом данных табл. 2 при параллельном выполнении нарушителем некоторых действий, направленных на обеспечение условий (14) и (15), в соответствии

с функциональной схемой время реализации процесса ПрПИ определяется по аналогии с условием (20).

$$\bar{\tau}_{\text{ПрПИ}} \approx \max \left\{ \begin{array}{l} \tau(d_{2.2}^{(1)}) + \tau(d_{2.2}^{(2)}) + \tau(d_{2.2}^{(3)}) + \tau(d_{2.2}^{(4)}) + \\ + \tau(d_{2.2}^{(5)}) + \tau(d_{2.2}^{(6)}) + \tau(d_{2.2}^{(7)}) + \tau(d_{2.2}^{(8)}); \\ \tau(d_{2.2}^{(1)}) + \tau(d_{2.2}^{(2)}) + \tau(d_{2.2}^{(3)}) + \tau(d_{2.2}^{(4)}) + \\ + \tau(d_{2.2}^{(9)}) + \tau(d_{2.2}^{(10)}) + \tau(d_{2.2}^{(11)}) + \tau(d_{2.2}^{(12)}). \end{array} \right.$$

Таблица 2

**Обозначения и содержание действий, выполняемых при реализации процесса перехвата речевой информации, циркулирующей в выделенном помещении, оборудованном средствами звукоуслечения и связи**

Название процесса	Содержание и обозначение среднего времени выполняемых действий при реализации процессов ПрЗИ, ПрПИ, ИПР	Обозначение действий	Среднее время выполнения действий, мин
1	2	3	4
Вариант № 1			
Реализация процессов защиты речевой информации, циркулирующей в выделенном помещении, оборудованном средствами звукоуслечения и связи перехвата, от перехвата за счет ПЭМИ РЭУ ОИ	Оперативное видеонаблюдение легитимных пользователей за территорией, прилегающей к КЗ ОИ, без использования ТС – $\bar{\tau}_{pl}^{ob}$	$d_{1.2}^{(1)}$	5
	Нарушитель выбирает место применения РПП ( $r = r_{\min}$ ), при котором обеспечиваются условия скрытности, – $\bar{\tau}_{pl}$	$d_{2.2}^{(1)}$	10
	Настройка ТС звукоуслечения для передачи речевой информации на ОИ – $\bar{\tau}_{st}$	$d_{3.2}^{(1)}$	15
	Патрулирование территории, прилегающей к КЗ ОИ, с применением средств радиоконтроля – $\bar{\tau}_{in}^{pr}$	$d_{1.2}^{(2)}$	5
	Выбор нарушителем места применения РПП в условиях оперативного видеонаблюдения легитимных пользователей за территорией, прилегающей к КЗ ОИ – $\bar{\tau}_{ob}^{ext}$	$d_{2.2}^{(2)}$	4
	Ожидание передачи речевой информации на ОИ – $\bar{\tau}_{ex}$	$d_{3.2}^{(2)}$	10
	Применение нарушителем РПП в режиме сканирования частотного диапазона без применения адаптационных мер защиты информации на ОИ при выполнении условия (14) – $\bar{\tau}_{in}$	$d_{2.2}^{(3)}$	4
	Применение нарушителем РПП в режиме сканирования частотного диапазона в условиях применения адаптационных мер защиты информации на ОИ при выполнении условия (14) – $\bar{\tau}_{in}^{ext}$	$d_{2.2}^{(4)}$	4
	Видеонаблюдение с последующим применением мобильных генераторов шума – $\bar{\tau}_{dir}^{pr}$	$d_{1.2}^{(3)}$	7,5
	Реализация информационного процесса ИПР – $\bar{\tau}_{ИПр}$	$d_{3.2}^{(3)}$	35
	Определения нарушителем направления максимального уровня излучения ПЭМИ без применения адаптационных мер защиты информации на ОИ – $\bar{\tau}_{dir}$	$d_{2.2}^{(5)}$	6
	Определения нарушителем направления максимального уровня излучения ПЭМИ в условиях применения адаптационных мер защиты информации на ОИ – $\bar{\tau}_{dir}^{ext}$	$d_{2.2}^{(6)}$	7,5
	Видеонаблюдение с последующим применением мобильных устройств имитации ПЭМИ – $\bar{\tau}_{cor}^{pr}$	$d_{1.2}^{(4)}$	7,5
	Корректирование нарушителем места применения РПП без применения адаптационных мер защиты информации на ОИ – $\bar{\tau}_{cor}$	$d_{2.2}^{(7)}$	10
	Корректирование нарушителем места применения РПП в условиях применения адаптационных мер защиты информации на ОИ – $\bar{\tau}_{cor}^{ext}$	$d_{2.2}^{(8)}$	7,5
Применение мобильных устройств, имитирующих ПЭМИ РЭУ ОИ, – $\bar{\tau}_{mod}^{pr}$	$d_{1.2}^{(5)}$	10	

Окончание табл. 2

1	2	3	4
	Выбор нарушителем режима работы РРП для перехвата реальных ПЭМИ без применения мер защиты – $\bar{\tau}_{mod}$	$d_{2.2}^{(9)}$	4
	Выбор нарушителем режима работы РРП для перехвата реальных ПЭМИ в условиях применения мер защиты – $\bar{\tau}_{mod}^{ext}$	$d_{2.2}^{(10)}$	5
	Применение носимых устройств, имитирующих ПЭМИ РЭУ ОИ, модулированных информационным сигналом, – $\bar{\tau}_{cu}^{pr}$	$d_{1.2}^{(6)}$	10
	Выбор нарушителем режима работы РРП, обеспечивающего соответствие характеристикам перехватываемого сигнала ПЭМИ с целью выполнения условия (15), без применения мер защиты информации – $\bar{\tau}_{cu}$	$d_{2.2}^{(11)}$	4
	Выбор нарушителем режима работы РРП, обеспечивающего соответствие характеристикам перехватываемого сигнала ПЭМИ с целью выполнения условия (15), в условиях применения мер защиты информации – $\bar{\tau}_{cu}^{ext}$	$d_{2.2}^{(12)}$	4
	Выполнена проверка свойств перехваченной информации в соответствии с условиями (14)–(16) без применения мер защиты – $\tau_{ИПр}^*$	$d_{M_2}^{(Sp)}$	$\approx 25$
	Выполнена проверка свойств перехваченной информации в соответствии с условиями (14)–(16) в условиях применения мер защиты – $\tau_{ИПр}^{*ЗИ}$	$d_{M_2}^{(Sp)}$	$\approx 25$

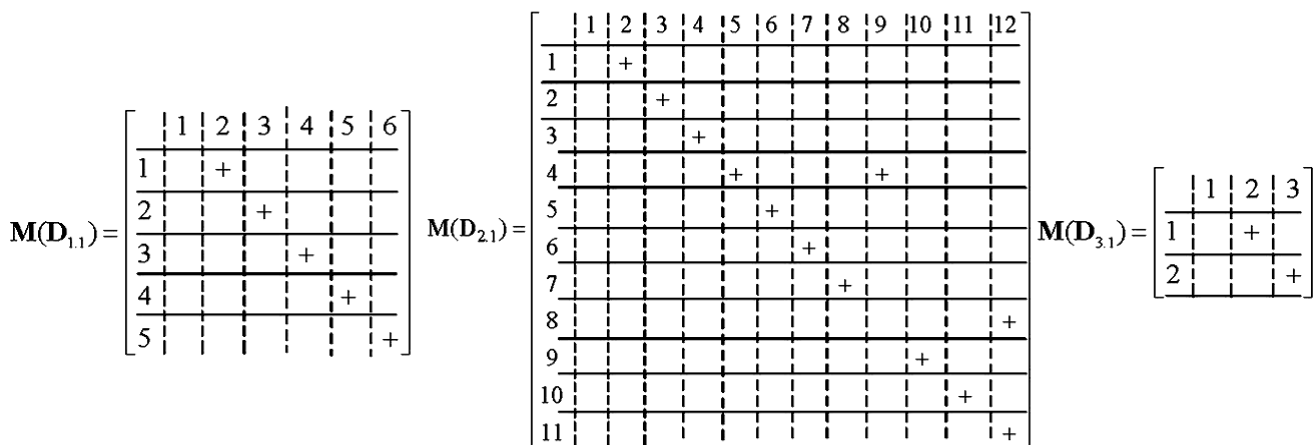
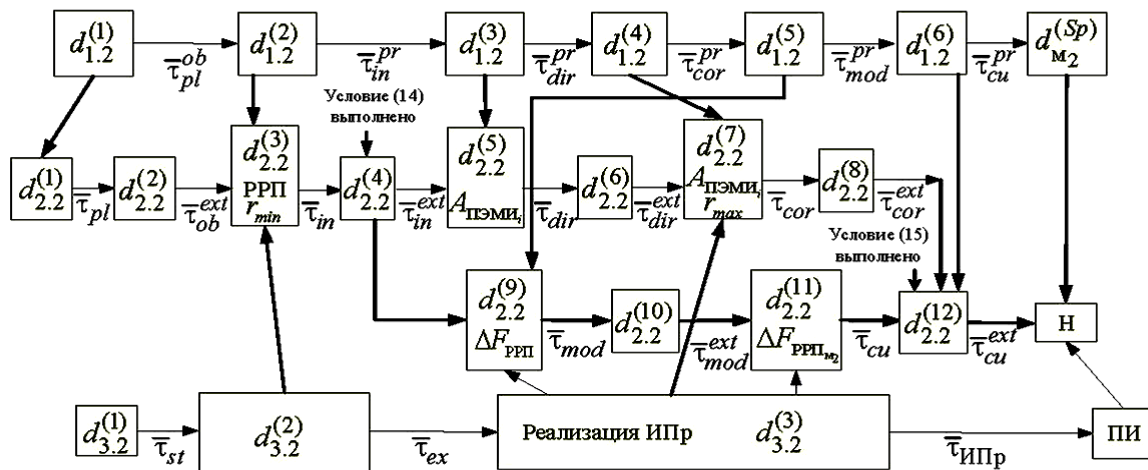


Рис. 5. Функциональная модель процессов передачи информации на объекте информатизации, ее перехвата по ТКУИ за счет ПЭМИ РЭУ объекта и защиты информации от перехвата при параллельном выполнении действий, обеспечивающих их реализацию. В условиях применения адаптивных мер защиты



С учетом данных, приведенных в табл. 2,  $\bar{t}_{\text{ПрПИ}} \approx 56$  мин,  $\bar{t}_{\text{ИПр}} \approx 55$  мин. При этом среднее время перехвата информации в условиях применения адаптивных мер защиты составит  $\bar{t}_{\text{ЗИ}}^{\text{ЗИ}} \approx 0$  мин. В этих условиях защищенность информации также можно считать обеспеченной.

На основе функциональных моделей, приведенных на рис. 5, могут быть получены лишь приближенные значения общих времен реализации параллельных процессов ИПр, ПрПИ и ПрЗИ.

Это обусловлено случайным характером времен выполнения действий в процессе реализации каждого из моделируемых процессов и экспертным способом их определения. Более того, неопределенность относительно вероятностных характеристик этих времен не позволяет получить адекватные оценки значений общих времен реализации указанных процессов и оценить защищенность информации в рассматриваемых условиях. При этом наличие множества логических условий достижения целей реализации этих процессов значительно усложняет решение задачи адекватной оценки защищенности информации.

#### Заключение

Представленные описательные и функциональные модели могут служить основой для разработки на основе аппарата сетей Петри–Маркова аналитических моделей оценки защищенности информации от ее утечки за счет ПЭМИ РЭУ ОИ в условиях динамики выполнения действий нарушителя и легитимных пользователей по реализации процессов перехвата и применения адаптивных мер защиты информации соответственно, учитывающих вероятностно-временной характер этих действий, выполняемых последовательно-параллельно при наличии определенных логических условий [28, 29], адекватно отражающих реализацию указанных процессов для конкретного ОИ и позволяющих получить аналитические соотношения для расчета показателей защищенности информации от утечки в условиях применения адаптивных мер защиты.

#### Литература

1. ГОСТ Р 51275–2006. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения [Электронный ресурс]. Утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2006 г. № 374-ст. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/docu-ment/gost-r-51275-2006>.
2. Специальные требования и рекомендации по технической защите конфиденциальной информации (СТР-К). Утв. приказом Гостехкомиссии России от 30.08.2002 № 282. – Режим доступа: [http://www.rfcmd.ru/sphider/docs/InfoSec/RD\\_FSTEK\\_requirements.htm](http://www.rfcmd.ru/sphider/docs/InfoSec/RD_FSTEK_requirements.htm)
3. Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах: приказ ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. № 17 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/70391358>.

4. Хорев А.А. Техническая защита информации: учеб. пособие для студентов вузов: в 3 т. – Т. 1: Технические каналы утечки информации / под ред. Ю.Н. Лаврухина. – М.: НПЦ «Аналитика», 2008. – 436 с.
5. Авсентьев О.С. Формирование обобщенного показателя ценности информации в каналах связи / О.С. Авсентьев, А.О. Авсентьев // Вестник Воронежского ин-та МВД России. – 2015. – № 3. – С. 55–63.
6. Авсентьев О.С. Математическая модель защиты информации от утечки по электромагнитным каналам / О.С. Авсентьев, А.Г. Вальде, А.Г. Кругов // Вестник Воронежского ин-та МВД России. – 2016. – № 3. – С. 42–50.
7. Авсентьев О.С. Функциональные модели процессов реализации угроз утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений объектов информатизации / О.С. Авсентьев, А.Г. Кругов, П.А. Шелупанова // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 29–39.
8. Оценка защищенности информационных процессов в территориальных органах внутренних дел: модели исследования / В.К. Джоган, А.С. Дерябин, В.С. Зарубин, В.В. Здольник, П.Е. Краснов, А.П. Курило, К.С. Скрыль, В.Н. Финько, А.Я. Фомин, А.А. Герасимов. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2010. – 217 с.
9. Методический документ «Меры защиты информации в государственных информационных системах». Утв. ФСТЭК России 11 февраля 2014 г. – Режим доступа: [fstec.ru](http://fstec.ru)
10. Авдеев В.Б. Сравнительная оценка методических подходов к расчёту отношения сигнал/шум в задачах контроля защищённости информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений / В.Б. Авдеев, А.В. Анищенко // Специальная техника. – 2016. – № 1. – С. 54–63.
11. Авдеев В.Б. Расчёт коэффициента ослабления побочных электромагнитных излучений / В.Б. Авдеев, А.Н. Катруша // Специальная техника. – 2013. – № 2. – С. 18–27.
12. Вильямс Дж.Д. Совершенный стратег, или Букварь по теории стратегических игр / пер. с англ. Ю.С. Голубева–Новожилова; под ред. И.А. Полегаева. – М.: Советское радио, 1960. – 264 с.
13. Никольский Б.А. Основы радиотехнических систем: электрон. учебник / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (3,612 Мбайт). – Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
14. Теория электрической связи: учеб. пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под общ. ред. К.К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с.
15. Кубанов В.П. Влияние окружающей среды на распространение радиоволн. – Самара: ПГУТИ, 2013. – 92 с.
16. Авсентьев О.С. Модель оптимизации процесса передачи информации по каналам связи в условиях угроз ее безопасности / О.С. Авсентьев, В.В. Меньших, А.О. Авсентьев // Телекоммуникации. – 2016. – № 1. С. 28–32.
17. Авсентьев О.С. Исследование взаимосвязей между электрическими параметрами информационных сигналов при обосновании показателя защищенности информации от утечки по электромагнитным каналам / О.С. Авсентьев, А.О. Авсентьев, А.Г. Кругов // Вестник Воронежского ин-та МВД России. – 2017. – № 2. – С. 125–135.
18. Авсентьев О.С. Исследование условий возникновения технических каналов утечки информации по побочным электромагнитным излучениям на объектах информатизации / О.С. Авсентьев, А.О. Авсентьев, А.Г. Вальде // Вестник Воронежского ин-та МВД России. – 2017. – № 3. – С. 22–31.

19. Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок: учеб. пособие / под ред. Ю.Н. Лаврухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 536 с.
20. Антипов Д.А. Исследование направленности побочного электромагнитного излучения от персонального компьютера / Д.А. Антипов, А.А. Шелупанов // Доклады ТУСУР. – 2018. – № 2. – С. 33–37.
21. Авсентьев А.О. Вербальная модель технического канала утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений на объектах информатизации / А.О. Авсентьев, С.В. Пономаренко, А.Г. Кругов // Вестник Воронежского ин-та ФСИН России. – 2020. – № 1. – С. 9–21.
22. Хорев А.А. Оценка возможности обнаружения побочных электромагнитных излучений видеосистемы компьютера // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 2. – С. 207–213.
23. Авсентьев О.С. Использование адаптационных методов для повышения защищенности информационных систем с направленными антеннами / О.С. Авсентьев, А.В. Золотухин, Р.В. Павлов, И.О. Плужникова, Н.Н. Толстых // Радиотехника. – 1999. – № 6. – С. 38–41.
24. Авдеев В.Б. К расчету уровней побочных электромагнитных излучений технических средств, входящих в состав персональных компьютеров // Телекоммуникации. – 2006. – № 2. – С. 40–44.
25. Авсентьев О.С. Обоснование показателя защищенности информации от утечки по электромагнитным каналам / О.С. Авсентьев, А.Г. Кругов // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 59–64.
26. Авсентьев О.С. Структурно-логическое представление процесса передачи информации на объектах информатизации / О.С. Авсентьев, А.В. Заряев, А.Г. Кругов // Вестник ВИ МВД. – 2020. – №1. – С. 22–32.
27. Буравцев А. В. Стратифицированный метод построения сложной системы // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – № 3 (20). – С. 23–32.
28. Игнатъев В.М. Сети Петри–Маркова / В.М. Игнатъев, Е.В. Ларкин. – Тула: ТулГУ, 1994. – 163 с.
29. Язов Ю.К. Основы методологии количественной оценки эффективности защиты информации в компьютерных системах. – Ростов/н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – 274 с.

Avsentev A.O., Krugov A.G., Perova Yu.P.

**Functional models of information protection against leakage due to spurious electromagnetic emissions of informatization objects**

The authors consider an approach to construct functional models of information protection against leakage caused by spurious electromagnetic radiation of structural elements of informatization objects. The approach takes into account the dynamics of parallel processes of interception of this information by an intruder and its protection by legitimate users from interception in the application of adaptive protection measures, based on a stratified representation of aggregates actions performed during the implementation of these processes.

**Keywords:** functional model, information properties, information value, technical channel for information leakage, adaptive information protection measures, electrical characteristics of electronic devices, spurious electromagnetic radiation, conditions for matching heterogeneous characteristics.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-17-35

*References*

1. GOST R 51275-2006. Protection of information. The object of informatization. Factors affecting information. General Provisions. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-51275-2006> (Accessed: March 11, 2020) (in Russ.).
2. «Special requirements and recommendations for the technical protection of confidential information (STR-K)», approved by order of the State Technical Commission of Russia of August 30, 2002 No. 282. Available at: [http://www.rfcmd.ru/sphider/docs/InfoSec/RD\\_FSTEK\\_requirements.htm](http://www.rfcmd.ru/sphider/docs/InfoSec/RD_FSTEK_requirements.htm) (Accessed: March 16, 2020) (in Russ.).
3. «About approval of requirements for the protection of information not constituting state secrets contained in state information systems»: Order of the State Technical Commission of Russia of February 11, 2013 No. 17. Available at: <https://base.garant.ru/70391358> (Accessed: March 16, 2020) (in Russ.).
4. Khorev A.A. *Tekhnicheskaya zashchita in-formatsii: uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov: v 3 t. T. 1: Tekhnicheskkiye kanaly utechki informatsii* [Technical protection of information: a textbook for university students: 3 vols. vol. 1: Technical channels for information leakage]. Ed. Yu.N. Lavrukina]. M.: SPC «Analytics», 2008. – 436 p. (in Russ.).
5. Avsentev O.S., Avsentev A.O. *Formirovaniye obobshchennogo pokazatelya tsennosti informatsii v kanalah svyazi* [The formation of the information value generalized index in the communication channels]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2015, no. 3, pp. 55–63 (in Russ.).
6. Avsentiev O.S., Valde A.G., Krugov A.G. *Matematicheskaya model' zashchity informatsii ot utechki po elektromagnitnym kanalom* [The mathematical model of information protection from leakage through electromagnetic channel]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2016, no. 3, pp. 42–50 (in Russ.).
7. Avsentiev O.S., Krugov A.G., Shelupanov A.A. *Funktsional'nyye modeli protsessov realizatsii ugroz utechki informatsii za schet pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniye ob"yektov informatizatsii* [Functional models of processes for realizing the threats of information leakage due to secondary electromagnetic emissions of objects of informatization]. *Proceedings of TUSUR University*, 2020, no. 1, pp. 29–39 (in Russ.).

**Авсентьев Александр Олегович**

Канд. техн. наук, ст. преп. каф. физики  
Воронежского института МВД России  
Патриотов пр-т, д. 53, г. Воронеж, Россия, 394065  
Тел.: +7 (473-2) 00-52-66  
Эл. почта: aooao8787@mail.ru

**Кругов Артем Геннадьевич**

Гл. специалист центра информационных технологий,  
связи и защиты информации УМВД России  
по Тверской области  
Мира пл., д. 1/70, г. Тверь, Россия, 170100  
Тел.: +7 (482-2) 32-93-93  
Эл. почта: krtemik@gmail.com

**Перова Юлия Петровна**

Ст. преп. института комплексной безопасности  
и специального приборостроения РТИ-МИРЭА  
Стромынка ул., д. 20, г. Москва, Россия, 107076  
Тел.: +7 (499-6) 81-33-56  
Эл. почта: julia\_pn@pochta.ru

8. Jogan V.K., Deryabin A.S., Zarubin V.S., Zdolnik V.V., Krasnov P.E., Kurilo A.P., Kurilo A.P., Skryl K.S., Finko V.N., Fomin A.Ya., Gerasimov A.A. *Otsenka zashchishchennosti informatsionnykh protsessov v territorial'nykh organakh vnutrennikh del: modeli issledovaniya : monografiya* [Security assessment of information processes in territorial internal affairs bodies: research models: monograph]. Voronezh: Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2010, 217 p. (in Russ.).
9. Methodical document «Information security measures in state information systems» approved by the State Technical Commission of Russia of February 11, 2014. Available at: [fstec.ru](http://fstec.ru) (in Russ.).
10. Avdeev V.B., Anischenko A.V. *Sravnitel'naya otsenka metodicheskikh podkhodov k raschotu otmosheniya signal/shum v zadachakh kontrolya zashchishchonnosti informatsii ot utechki za schot pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniy* [Comparative evaluation of methodological approaches to calculating the signal-to-noise ratio in the tasks of monitoring information security from leakage due to secondary electromagnetic radiation]. *Special Technique*, 2016, no. 1, pp. 54–63 (in Russ.).
11. Avdeev V.B., Katruscha A.N. *Raschot koeffitsiyenta oslablyeniya pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniy* [Calculation of the coefficient of attenuation of secondary electromagnetic radiation]. *Special Technique*, 2013, no. 2, pp. 18–27 (in Russ.).
12. J.D. Williams *Sovershennyy strateg ili bukvar' po teorii strategicheskikh igr* [The perfect strategist or primer on the theory of strategic games] Translated from English by Yu.S. Golubeva–Novozhilova edited by I.A. Polegaeva. M.: Publishing house «Soviet Radio», 1960. 264 p. (in Russ.).
13. Nikolsky, B. A. *Osnovy radiotekhnicheskikh sistem (elektron. Uchebnik)* [Fundamentals of radio systems (electron. textbook) [Electronic resource] Ministry of Education and Science of Russia, Samar. state aerospace. un-t them. S.P. Koroleva (National Research University). The electron. text and graph. Dan. (3.612 MB), Samara, 2013, 1 opt. disk (CD-ROM) (in Russ.).
14. Vasiliev K.K., Glushkov V.A., Dormidontov A.V., Nesterenko A.G. *Teoriya elektricheskoy svyazi: uchebnoye posobiye* [Theory of electrical communication: a training manual].; under the general. ed. K.K. Vasilieva. Ulyanovsk: UISTU, 2008. 452 p. (in Russ.).
15. Kubanov V.P. *Vliyaniye okruzhayushchey sredy na rasprostraneniye radiovoln* [The influence of the environment on the propagation of radio waves]. Samara: PSUTI, 2013. 92 p. (in Russ.).
16. Avsentev O.S., Menshikh V.V., Avsentev A.O. *Model' optimizatsii protsessa peredachi informatsii po kanalam svyazi v usloviyakh ugroz yeye bezopasnosti* [Process optimization model of information transfer through communication channels under threat conditions for its security]. *Telecommunications*, 2016, no. 1, pp. 28–31 (in Russ.).
17. Avsentev O.S., Avsentev A.O., Krugov A.G. *Issledovaniye vzaimosvyazey mezhdru elektricheskimi parametrami informatsionnykh signalov pri obosno-vanii pokazatelya zashchishchennosti informatsii ot utechki po elektromagnitnym kanalam* [The research of the interrelationships between electrical parameters of information signals in the justification of increased security against leakage of information by electromagnetic channels]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2017, no. 2, pp. 125–135 (in Russ.).
18. Avsentev O.S., Avsentev A.O., Valde A.G. *Issledovaniye usloviy vozniknoveniya tekhnicheskikh kanalov utechki informatsii po pobochnym elektromagnitnym izlucheniyam na ob'yektakh informatizatsii* [Investigation of the conditions for the occurrence of technical channels for information leakage due to spurious electromagnetic radiation at information objects]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2017, no. 3, pp. 22–31 (in Russ.).
19. Menshakov Yu. K. *Teoreticheskiye osnovy tekhnicheskikh razvedok : ucheb. posobiye* [Theoretical foundations of technical intelligence: textbook. Allowance. ed. Yu.N. Lavrukhnina]. M.: Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2008. 536 p. (in Russ.).
20. Antipov D.A., Shelupanov A.A. *Issledovaniye napravlenosti pobochnogo elektromagnitnogo izlucheniya ot personal'nogo komp'yutera* [A study of the direction of incidental electromagnetic radiation from a personal computer]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, no. 2, pp. 33–37 (in Russ.).
21. Avsentiev A.O., Ponomarenko S.V., Krugov A.G. *Verbal'naya model' tekhnicheskogo kanala utechki informatsii za schet pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniy na ob'yektakh informatizatsii* [Verbal model of the technical channel of information leakage due to spurious electromagnetic radiation at informatization facilities]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*, 2020, no. 1, pp. 9–21 (in Russ.).
22. Khorev A.A. *Otsenka vozmozhnosti obnaruzheniya pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniy videosistemy komp'yutera* [Assessment of the possibility of detecting incidental electromagnetic radiation of a computer video system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 2, pp. 207–213 (in Russ.).
23. Adaptive methods using for protection improvement of informational system with narrow radiation pattern. Avsent'ev O.S., Zolotukhin A.V., Pavlov R.V., Pluzhnikova I.O., Tolstykh N.N. *Radio engineering*, 1999, no. 6, pp. 38–41 (in Russ.).
24. Avdeev V.B. *K raschetu urovney pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniy tekhnicheskikh spedstv, vkhodyashchikh v sostav pepsional'nykh komp'yutepov* [To the calculation of the level of spurious electromagnetic emissions of technical equipment that are part of personal computers]. *Telecommunications*, 2006, no. 2, pp. 40–44 (in Russ.).
25. Avsentev O.S., Krugov A.G. *Obosnovaniye pokazatelya zashchishchennosti informatsii ot utechki po elektromagnitnym kanalam* [Rationale for increased DLP index to protect information from leakage via electromagnetic channels]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 59–64 (in Russ.).
26. Avsentiev O.S., Zaryayev A.V., Krugov A.G. *Strukturno-logicheskoye predstavleniye protsessa peredachi informatsii na ob'yektakh informatizatsii* [Structural-logical representation of the process of information transfer on objects of in-formatization]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2020, no.1 pp. 22–32 (in Russ.).
27. Buravtsev A. V. *Stratifikatsionnyy metod postroyeniya slozhnoy sistemy* [A stratified method for constructing a complex system]. Educational resources and technologies, 2017, no. 3 (20), pp. 23–32 (in Russ.).
28. Ignatiev, V.M. *Seti Petri–Markova* [Petri – Markov networks]. Tula: TulGTU, 1994, 163 p. (in Russ.).
29. Yazov Y.K. *Osnovy metodologii koli-chestvennoy otsenki effektivnosti zashchity in-formatsii v komp'yuternykh sistemakh* [Fundamentals of the methodology for the quantitative assessment of the effectiveness of the protection of information in computer systems]. Rostov-on-Don, Publishing House SKNTs VSh, 2006, 274 p. (in Russ.).

**Alexander O. Avsentev**

Candidate of Engineering Sciences.  
Senior Lecturer of the chair of Physics  
Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia  
53, Patriotov pr., Voronezh, Russia, 394065  
Phone: +7 (473-2) 00-52-66  
E-mail: aoaao8787@mail.ru

**Yulia P. Perova**

Senior Lecturer  
Institute for Integrated Security and Special Instrumentation  
RTI-MIREA  
20, Stromynka st., Moscow, Russia, 107076  
Phone: +7 (499-6) 81-33-56  
E-mail: ulia\_pn@pochta.ru

**Artem G. Krugov**

Chief specialist of the center of information technology,  
communications and information protection.  
Ministry of Internal Affairs of Russia in the Tver region  
1, Mira sq., 70, Tver, Russia, 170100  
Phone: +7 (482-2) 32-93-93  
E-mail: krtemik@gmail.com

УДК 519.873

А.С. Колтайс, А.А. Шатрова, А.А. Шелупанов

## Математическая модель выбора контрагента при оценке рисков информационной безопасности

Рассмотрены основные методы, используемые при построении математической модели оценки благонадёжности контрагента. Описаны форматы преобразования данных для возможности их использования в ходе моделирования, а также предъявляемые требования к модели. Была проведена проверка зависимости между входными данными для исключения из модели одинаковых атрибутов. Выявлены основные сложности в оценке точности и полноты модели. Описано использование кроссвалидации для устранения сложностей при построении модели. Разработанная модель даёт точный результат при малом количестве сравниваемых контрагентов, что соответствует порядку проверки контрагента в реальной системе.

**Ключевые слова:** модель, благонадёжность, риски, информационно-аналитические системы, машинное обучение.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-36-41

В последние годы внимание к проблеме наличия недекларированных возможностей в программном обеспечении усилилось – выпущены несколько регламентирующих документов.

ФСТЭК России приказом № 131 от 30 июля 2018 г. утвердил «Требования по безопасности информации, устанавливающие уровни доверия к средствам технической защиты информации и средствам обеспечения безопасности информационных технологий» [1], а 11 февраля 2019 г. утвердил «Методику выявления уязвимостей и недекларированных возможностей в программном обеспечении» [2]. Банк России утвердил стандарт СТО БР ИББС-1.4-2018 «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Управление риском информационной безопасности при аутсорсинге» [3], в котором обязывает подведомственные организации управлять и контролировать риски нарушения информационной безопасности, в том числе при аутсорсинге разработки программного обеспечения. Выявление вероятностных нарушителей, создание модели нарушителя безопасности конфиденциальной информации – один из основных этапов проведения предпроектного обследования и формирования требований по защите информации, обрабатываемой и хранимой в информационных системах [4]. Таким образом, оценка вероятности внедрения разработчиком недекларированных возможностей в программное обеспечение, в частности, при аутсорсинге разработки, является актуальной задачей.

Специфической особенностью разработки АСУ ТП является распределение программного обеспечения на несколько уровней – уровень исполнительных устройств, уровень автоматического управления и уровень операторского управления. Для качественной оценки вероятности внедрения недекларированных возможностей необходимо учитывать структуру системы, а также интерфейсы взаимодействия между подсистемами АСУ ТП и между различными программными комплексами.

Вероятностная модель для оценки потенциального внедрения недекларированных возможностей в

программные комплексы является актуальной для двух этапов жизненного цикла разработки ПО – выбор исполнителя (компании-разработчика) и согласования технического задания. Для этапа приемки работ актуальным является применение методов выявления уязвимостей и недекларированных возможностей.

К примеру, при разработке вероятностной модели для этапа выбора компании-разработчика – основными направлениями построения планируются:

- анализ потенциальных компаний разработчиков на основе параметров, характеризующих благонадёжность компаний и их потенциальные связи с конкурентами (в том числе иностранными);

- учет имеющихся в открытом доступе источников информации о деятельности контрагента в сфере информационной безопасности («Государственный реестр сертифицированных средств защиты информации» и т.п.).

При этом под благонадёжностью будем понимать свойство контрагента, отражающее отсутствие предрасположенности совершать в процессе совместной договорной деятельности действия или бездействие, наносящие ущерб компании в форме прямых материальных потерь и (или) в качестве снижения или потери его деловой репутации.

Проверку корпоративной информации компании в своей работе рассмотрели О. На, В.П. Ли, Ю.Я. Ким и Г. Чанг, а также предложили рейтинговую модель проверки информации в рамках обеспечения экономической безопасности организации, основанной на 14 факторах, которые включают общую информацию об организации, внутреннюю информацию организации и дополнительные данные. Но эта модель даёт только общую оценку потенциальному контрагенту, не затрагивая особенности законодательства в различных сферах и оценку рисков со стороны информационной безопасности [5].

### Описание модели

В настоящее время частичную проверку благонадёжности контрагента, как правило, осуществляют отдельные специализированные отделы компании на основе информационных систем, например,

систем СПАРК, Интегрум и др. Так как данные проверки затратны по времени и могут содержать ошибки вследствие влияния человеческого фактора, а также не учитываются специфические для отрасли параметры, существует необходимость автоматизировать процесс оценки рисков управленческого решения по сотрудничеству с контрагентом (компанией-разработчиком) [6–8].

Для этого была построена модель по оценке риска сотрудничества с контрагентом.

В процессе моделирования в качестве входных данных для модели использовалась выборка из информационно-аналитической системы (ИАС) СПАРК [9], которая представляет собой список контрагентов и их характеристики: возраст компании, среднесписочная численность, важная информация, чистая прибыль (убыток), период погашения дебиторской задолженности (в днях), период погашения кредиторской задолженности (в днях), период оборота основных средств, период оборота активов, коэффициент текущей ликвидности, коэффициент быстрой ликвидности, коэффициент абсолютной ликвидности.

В качестве выходных данных выступает список числовых состояний контрагентов: (-1) – контрагент не благонадёжный, (+1) – контрагент благонадёжный.

При этом модель должна соответствовать следующим требованиям:

- адекватность;
- адаптивность;
- эффективность;
- точность модели должна превышать 80%;
- полнота модели должна превышать 80%.

При этом под точностью модели [10] понимается отношение верных срабатываний к сумме верных и ложных срабатываний.

Под полнотой модели [10] понимается отношение верных срабатываний к сумме верных срабатываний и ложных пропусков.

В качестве метода построения модели будет применяться метод стохастического градиента, который может использоваться при машинном обучении [11]. При этом сначала будет производиться обучение на выборке  $x^j = (x_i, y_i)_{i=1}^l$ , где  $x_i \in \mathbb{R}^n$  – объекты,  $y_i \in \{-1; +1\}$  – ответы «учителя».

Самой моделью будет являться линейная модель классификации

$$a(\mathbf{x}; \mathbf{w}) = \text{sign} \langle \mathbf{x}, \mathbf{w} \rangle, \quad (1)$$

где  $\text{sign} \langle \mathbf{x}, \mathbf{w} \rangle$  – знак скалярного произведения вектора  $\mathbf{x}$  на вектор  $\mathbf{w}$ .

Чтобы найти неизвестный вектор  $\mathbf{w}$ , поставим задачу минимизации функционала доли неправильных ответов

$$\begin{aligned} Q(a, X) &= \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l [a(x_i; \mathbf{w}) \neq y_i] = \\ &= \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l [\text{sign} \langle \mathbf{x}, \mathbf{w} \rangle \neq y_i] \rightarrow \min_{\mathbf{w}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Этот функционал является дискретным относительно весов, и поэтому, чтобы можно было вос-

пользоваться градиентом методом, необходимо свести задачу к минимизации гладкого функционала:

$$Q(\mathbf{w}, X) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l [y_i \langle x_i, \mathbf{w} \rangle < 0] \rightarrow \min_{\mathbf{w}}. \quad (3)$$

Введем величину  $M_i(\mathbf{w}) = y_i \langle x_i, \mathbf{w} \rangle$  – отступ (margin) объекта  $x_i$ :

$$Q(\mathbf{w}, X) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l [M_i(\mathbf{w}) < 0] \rightarrow \min_{\mathbf{w}}. \quad (4)$$

Знак отступа показывает корректность ответа классификатора (положительный отступ соответствует правильному ответу, отрицательный – неправильному), а его абсолютная величина характеризует степень уверенности классификатора в своём ответе. Скалярное произведение  $\langle \mathbf{x}, \mathbf{w} \rangle$  пропорционально расстоянию от разделяющей гиперплоскости до объекта соответственно, чем ближе отступ к нулю, тем ближе объект к границе классов, тем ниже уверенность в его принадлежности.

Функционал согласно формуле (2) оценивает ошибку алгоритма на объекте с помощью пороговой функции потерь  $L(M) = [M < 0]$ , где аргументом функции является отступ  $M(\mathbf{w}) = y \langle \mathbf{x}, \mathbf{w} \rangle$ . Чтобы ввести гладкий функционал, оценим эту функцию во всех точках  $M$ :  $L(M) \leq \tilde{L}(M)$ .

После этого можно получить верхнюю оценку на функционал

$$Q(\mathbf{w}, X) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \tilde{L}(y_i \langle \mathbf{x}, \mathbf{w} \rangle) \rightarrow \min_{\mathbf{w}}. \quad (5)$$

При этом если верхняя оценка  $\tilde{L}(M)$  будет гладкой, то и  $L(M)$  будет гладкой. Если верхнюю оценку удастся приблизить к нулю, то и доля неправильных ответов тоже будет близка к нулю.

В качестве верхней оценки будет использоваться логистическая функция потерь

$$\tilde{L}(M) = \log(1 + e^{-M}). \quad (6)$$

Таким образом, целевая функция будет выражаться в минимизации верхней оценки  $\tilde{L}(M)$ .

### Построение модели

Для моделирования были рассмотрены компании, основной вид деятельности которых, согласно ОКВЭД, «62 – разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги».

Общее количество компаний согласно ИАС СПАРК [9] составило 34 324, из которых 46,53% компаний относятся к «благонадёжным», 53,47% – к «неблагонадёжным». Для моделирования была взята выборка с расширением .csv из 3 432 компаний, которая соответствует распределению благонадёжности в исходной выборке (табл. 1). При этом благонадёжность определялась по свободному индикатору риска (табл. 2): если риск «низкий», то компания благонадёжна, если «средний» или «высокий», то компания неблагонадёжна [9].

Таблица 1

## Распределение благонадежности в исходной выборке и в выборке для моделирования

Вид компании	Кол-во	%	Выборка для моделирования	%
Благонадежная	15 970	46,53	1 597	46,53
Неблагонадежная	18 354	53,47	1 835	53,47
Общее кол-во	34 324	100	3 432	100

Таблица 2

## Риски в ИАС СПАРК

Риски в ИАС СПАРК		
ИДО	ИФР	ИПД
Индекс должной осмотрительности представляет собой значение от 1 до 99, где более высокое значение отражает большую вероятность того, что компания создана не для уставных целей, а в качестве «транзакционной единицы», не имеющей существенных собственных активов и операций, или является «брошенным» активом	Индекс финансового риска представляет собой значение от 1 до 99, где более высокое значение указывает на наличие признаков неудовлетворительного финансового состояния, которые могут привести к тому, что компания утратит платежеспособность	Индекс платежной дисциплины (Paydex) представляет собой значение от 0 до 100, где более низкое значение указывает на высокий риск просрочки платежей. Индекс платежной дисциплины рассчитывается автоматически на основании данных по платежам компании

Была проведена проверка наличия зависимости между входными данными путем подсчета коэффициента корреляции и его оценки по шкале Чеддока. В результате было решено исключить «коэффициент текущей ликвидности» и «коэффициент быстрой ликвидности» из входных данных, так как между ними и «коэффициентом абсолютной ликвидности» присутствует сильная и очень сильная связь (значения коэффициента корреляции от 0,7 до 0,9 и больше 0,9 соответственно).

Для успешного применения метода машинного обучения над входными данными были осуществлены следующие преобразования:

- разделитель целой и дробной части в Excel был определен как «.»;
- убрано разделение групп разрядов в Excel;
- преобразованы данные в текстовом формате к числовому формату согласно табл. 3;
- преобразованы аномальные значения: все отрицательные значения периода погашения кредиторской задолженности, периода погашения дебиторской задолженности, периода оборота основных средств, периода оборота активов были определены как «-1»;
- убраны пропуски в данных: пропуски в «Размер компании» были определены как «-1», остальные пропуски как «0»;
- приведены данные к одному масштабу от 0 до 1.

Таблица 3

## Преобразование данных в текстовом формате к числовому формату

Наименование	Преобразование
Размер компании	0 – микропредприятия, 1 – малые предприятия, 2 – средние предприятия, 3 – крупные предприятия
Важная информация	0 – важной информации нет, 1 – важная информация есть

При моделировании использовался метод `linear_model.SGDClassifier()` библиотеки `sklearn Python`. Значения атрибутов принимались по умолчанию [12], кроме следующих:

- `loss` – функция потерь, значение – 'log';
- `random_state` используется, чтобы была возможность повторить эксперименты, значение – 70;
- `alpha` – константа, которая умножается на `penalty` (по умолчанию – 0,0001), проведены эксперименты для 0,01, 0,001, 0,0001;
- `max_iter` – максимальное количество проходов по тренировочным данным (так называемые эпохи), по умолчанию – 1 000, было выявлено оптимальное максимальное количество проходов, чтобы избежать проблему переобучения;
- `tol` – критерий остановки: обучение остановится, когда `loss > best_loss - tol` (по умолчанию – 0,001), проведены эксперименты для None, 0,01, 0,001, 0,0001.

При проведении экспериментов оказалось, что точность и полноту в силу несбалансированности ответов модели и реальной системы сложно оценивать, поэтому было решено заменить оценку точности и полноты на оценку ROC-кривой (AUC-ROC), которая показывает зависимость количества верно классифицированных положительных ответов от количества неверно классифицированных отрицательных ответов. При этом критерий AUC-ROC должен быть более 80% [13–15].

Эксперименты проводились отдельно для каждого атрибута (табл. 4).

Таблица 4

## Результаты экспериментов над атрибутами модели

Атрибут	Точность	Полнота	Доля верных ответов	AUC-ROC
alpha = 0,01	0,69	0,84	0,76	0,75
alpha = 0,001	0,75	0,73	0,76	0,76
alpha = 0,0001	0,76	0,69	0,76	0,75
tol = None	0,76	0,70	0,76	0,75
tol = 0,01	0,70	0,87	0,77	0,76
tol = 0,001	0,76	0,69	0,76	0,76
tol = 0,0001	0,82	0,62	0,71	0,75

По итогам экспериментов было решено установить `max_iter = 30`, чтобы уменьшить время обучения, `alpha = 0,001`, `tol` оставить по умолчанию. Итоговое значение критерия AUC-ROC составляет порядка 75%.

При этом модель не соответствует требованиям (критерий AUC-ROC меньше 80%). Для повышения точности результатов моделирования на этапе обучения модели можно использовать кроссвалидацию [15]: при оценке модели имеющиеся в наличии данные разбиваются на  $k$  частей, затем на  $k-1$  частях данных производится обучение модели, а оставшаяся часть данных используется для тестирования. Процедура повторяется  $k$  раз; в итоге каждая из  $k$  частей данных используется для тестирования.

В результате модель на более равномерных данных обучается эффективнее, вследствие чего повышается точность её результатов.

Было использовано четыре разновидности кроссвалидации [16]:

1) KFold – классический метод кросс-валидации, выборка разделяется на  $k$  групп, при этом один объект может появиться в группах только один раз, соотношение классов не сохраняется.

2) StratifiedKFold – метод кросс-валидации, при котором выборка разделяется на  $k$  групп с сохранением соотношений классов.

3) ShuffleSplit – метод кросс-валидации, при котором выборка разделяется на  $k$  групп со случайными перестановками, т.е. один объект может появиться в группах несколько раз.

4) StratifiedShuffleSplit – метод, который представляет собой слияние StratifiedKFold и ShuffleSplit, т.е. выборка разделяется на  $k$  групп с сохранением соотношений классов и со случайными перестановками.

В результате по методу

– KFold качество модели – 0,83;

– StratifiedKFold – 0,83;

– ShuffleSplit – 0,83;

– StratifiedShuffleSplit – 0,84.

Все значения критерия AUC-ROC больше 80%, а значит, требования качества выполняются при использовании всех методов. Так как при StratifiedShuffleSplit достигается максимальная точность модели, итоговая модель будет содержать этот метод.

Далее были произведены анализ результатов и проверка выполнимости требований к модели:

– адекватность;

– адаптивность;

– эффективность;

– критерий AUC-ROC должен быть более 80%.

На тестовых данных было проведено прогнозирование благонадёжности контрагента при помощи построенной модели, при этом количество объектов (компаний) изменялось от 2 до 100. Выяснилось, что при малом количестве сравниваемых контрагентов (меньше 7) модель правильно классифицирует благонадёжность контрагента. При 17 и более сравниваемых контрагентов качество модели уже не соответствует требованиям качества по критерию AUC-ROC. Но в силу специфики проверки контрагента перед заключением договорных отношений (как правило, сравнивается до 10 компаний), можно считать, что модель соответствует данному требованию.

Также была проверена адекватность модели по средним значениям отклика модели и системы при помощи t-критерия Стьюдента [17] с уровнем значимости в 5% (табл. 5). На всех тестовых данных  $p$ value больше, чем 0,05, значит, гипотеза отвергается, средние значения отклика модели и системы равны, т.е. модель адекватна.

Таблица 5

Пример качества прогнозирования благонадёжности контрагента при помощи построенной модели

Количество объектов	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
AUC-ROC	1	1	1	1	1	1	0,83	0,83	0,87	0,87
Statistic	none	none	none	none	none	none	none	none	-1	-1
Pvalue	none	none	none	none	none	none	none	none	0,3434	0,34
Количество объектов	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22
AUC-ROC	0,9	0,9	0,84	0,85	0,85	0,79	0,74	0,74	0,75	0,75
Statistic	-1	-1	0	0	0	-0,57	-1	-1	-1	-1
Pvalue	0,34	0,34	1	1	1	0,58	0,33	0,33	0,33	0,33

Адаптивность показывает возможность модели приспосабливаться к изменениям внешней среды и оригинала. Так как модель можно переобучать на новых данных, данное требование выполняется.

Эффективность отражает приемлемое время решения проблемы, объем занимаемой памяти и ресурсов. При моделировании были подобраны атрибуты модели так, чтобы время выполнения и качество модели были оптимальными.

#### Заключение

В результате экспериментов была разработана модель по оценке рисков управленческого решения по сотрудничеству с контрагентом, которая класси-

фицирует контрагента как благонадёжный («+1») или неблагонадёжный («-1»). При этом модель дает точный результат при малом количестве сравниваемых контрагентов, что соответствует порядку проверки контрагента в реальной системе. Данная модель может быть использована при разработке политики информационной безопасности, в частности в вопросах, связанных с оценкой рисков надёжности контрагента.

#### Литература

1. Выписка из требований по безопасности информации, утвержденных приказом ФСТЭК России от 30 июля



2018 г. № 131 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/2050-vypiska-iz-trebovanij-po-bezopasnosti-informatsii-utverzhdennykh-prikazom-fstek-rossii-ot-30-iyulya-2018-g-n-131> (дата обращения: 03.04.2020).

2. Методика выявления уязвимостей и недекларированных возможностей в программном обеспечении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new.groteck.ru/images/catalog/70840/e75c72a254fcc880fa65657fdb144063.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

3. СТО БР ИББС-1.4-2018. Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Управление риском нарушения информационной безопасности при аутсорсинге [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/556983635> (дата обращения: 23.04.2020).

4. Миронова В.Г. Модель нарушителя безопасности конфиденциальной информации / В.Г. Миронова, А.А. Шелупанов // Информатика и системы управления. – 2012. – № 1(31). – С. 28–35.

5. Park S. Improvement of personal information protection level in the military using the measurement of disclosure risk / С. Park, С. Kim, Y. Kim, Н. An, J. Bae // Journal of Security Engineering. – 2015. – Vol. 12, № 6. – P. 581–596.

6. Информационно-аналитическая система «СПАРК» при обеспечении экономической безопасности предприятия / А.С. Колтайс, А.А. Конев // Экономическая безопасность: финансовые, правовые и IT-аспекты: сб. матер. первой Всерос. науч.-практ. онлайн-конф.: Иркутск – Томск: Изд-во ТГУ, 2017. – С. 178–182.

7. Мероприятия по проверке контрагентов с помощью информационно-аналитических систем на основе существующих методик / А.С. Колтайс, А.А. Колтайс, А.А. Шатрова, Ю.А. Рубцова // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сб. науч. трудов V Междунар. науч. конф. в 2 ч. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – Ч. 2. – С. 418–422.

8. Automation of tax control mechanism with the use of specialized information and analytical systems within the framework of ensuring security / A. Koltays, A. Shatrova, A. Konev, P. Shelupanova // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research – 2020. – Vol. 8, No. 4. – P. 1405–1409. – <https://doi.org/10.30534/ijeter/2019/027122019>

9. ИАС «СПАРК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spark-interfax.ru/> (дата обращения: 30.04.2020).

10. Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 112 с.

11. Гасников А.В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска: учеб. пособие. – 2-е изд., доп. – М.: МФТИ. – 2018. – 288 с.

12. sklearn.linear\_model.SGDClassifier [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear\\_model.SGDClassifier.html/](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.SGDClassifier.html/) (дата обращения: 07.05.2020).

13. Петри А. Наглядная медицинская статистика: учеб. пособие / А. Петри, К. Сэбин; пер. с англ. под ред. В.П. Леонова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. – 216 с.

14. Файнзилбергер Л.С. Гарантированная оценка эффективности диагностических тестов на основе усиленного ROC анализа // Управляющие системы и машины. – 2009. – № 5. – С. 3–13.

15. Fawcett T. An introduction to ROC analysis // Pattern Recognition Letters. – 2006. – Vol. 27. – P. 861–874.

16. Refaeilzadeh P. Cross Validation. Encyclopedia of Database Systems/ Refaeilzadeh P., Tang L., Liu H.// New York: Springer, 2009. – P. 532–538.

17. Scipy.stats.ttest\_relvalidation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.ttest\\_rel.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.ttest_rel.html) (дата обращения: 13.05.2020).

#### Колтайс Андрей Станиславович

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-923-403-40-93  
Эл. почта: [kas2@keva.tusur.ru](mailto:kas2@keva.tusur.ru)

#### Шатрова Александра Александровна

Студентка каф. безопасности информационных систем (БИС) ТУСУРа  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29  
Эл. почта: [shatrovaaleks@gmail.com](mailto:shatrovaaleks@gmail.com)

#### Шелупанов Александр Александрович

Д-р техн. наук, профессор, президент ТУСУРа  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 90-71-55  
Эл. почта: [saa@tusur.ru](mailto:saa@tusur.ru)

Koltays A.S., Shatrova A.A., Shelupanov A.A.

#### Mathematical model for selecting a contractor to assess information security risks

The article deals with the main methods used to construct a mathematical model for assessing the welfare of the counterparty. The formats of data transformation are described in order to use them when modeling, as well as the requirements to the model. The dependence between input data was checked to exclude equal attributes from the model. The main difficulties in assessing the accuracy and completeness of the model were identified. The use of cross-validation to eliminate the difficulties in model building was described. The developed model gives an accurate result with a small number of compared counterparties, that corresponds to the checking order of the counterparty in the real system.

**Keywords:** model, dependability, risks, information-analytical systems, machine training.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-36-41

#### References

1. Vypiska iz Trebovanii po bezopasnosti infor-matsii, utverzhdennykh prikazom FSTEK Rossii ot 30 iyulya 2018 g. No 131. Available at: <https://fstec.ru/2050-vypiska-iz-trebovanij-po-bezopasnosti-informatsii-utverzhdennykh-prikazom-fstek-rossii-ot-30-iyulya-2018-g-n-131> (Accessed: April 3, 2020) (in Russ.).

2. Metodika vyyavleniya uязvimostei i nedeklarirovannykh vozmozhnostei v programmnom obespechenii. Available at: <http://new.groteck.ru/images/catalog/70840/e75c72a254fcc880fa65657fdb144063.pdf> (Accessed: April 15, 2020) (in Russ.).

3. STO BR IBBS-1.4-2018 Obespechenie informatsionnoi bezopasnosti organizatsii bankovskoi sistemy Rossiiskoi Federatsii. Upravlenie riskom narusheniya informatsionnoi bezopasnosti pri outsorsinge. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/556983635> (Accessed: April 23, 2020) (in Russ.).

4. Mironova V.G. Model' narushitelya bezopasnosti konfidentsial'noi informatsii / Mironova V.G., Shelupa-nov A.A. // *Informatika i sistemy upravleniya*. 2012, № 1(31), pp. 28–35.
5. Park C., Kim C., Kim Y., An H., Bae J. Improvement of personal information protection level in the military using the measurement of disclosure risk. *Journal of Security Engineering*, 2015, vol. 12, no. 6, pp. 581–596.
6. Koltays A.S., Konev A.A. *Informatsionno-analiticheskaya sistema «SPARK» pri obespechenii ekonomicheskoi bezopasnosti predpriyatiya*. [Ekonomicheskaya bezopasnost': finansovye, pravovye i IT-aspekty: sbornik materialov pervoi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi onlain-konferentsii], 2017, Baikal'skii gosudarstvennyi universitet, pp. 178–182 (in Russ.).
7. Koltays A.S., Koltays A.A., Shatrova A.A., Rubtsova Yu.A. *Meropriyatiya po proverke kontragentov s pomoshch'yu informatsionno-analiticheskikh sistem na osnove sushchestvuyushchikh metodik*. [Informatsionnye tekhnologii v nauke, upravlenii, sotsial'noi sfere i meditsine: sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Tomsk]: TPU, 2018, vol. 2, pp. 418–422 (in Russ.).
8. Koltays A. Shatrova A. Shelupanova P. Automation of tax control mechanism with the use of specialized information and analytical systems within the framework of ensuring security. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 1405–1409. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2019/027122019>
9. IAS «SPARK» Available at: <http://www.spark-interfax.ru/> (Accessed: April 30, 2020) (in Russ.).
10. Zvonarev, S.V. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya: uchebnoe posobie*. [Basics of mathematical modeling] Ekaterinburg: Ural. un-t, 2019. 112 p. (in Russ.)
11. Gasnikov A.V. *Sovremennyye chislennyye metody optimizatsii. Metod universal'nogo gradientnogo spuska: uchebnoe posobie* [Modern numerical optimization methods. The universal gradient descent method: a training manual], 2 ed. M.: MFTI, 2018, 288 p. (in Russ.)
12. `sklearn.linear_model.SGDClassifier`. Available at: [https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear\\_model.SGDClassifier.html/](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.SGDClassifier.html/) (Accessed: May 7, 2020).
13. Petri A., Sebin K. *Naglyadnaya meditsinskaya statistika* [Visual mathematical statistics]. Tutorial. Ed. V.P. Leonov. M., GEOTAR-Media Publ, 2015, 216 p. (in Russ.).
14. Fainzil'berg L.S. *Garantirovannaya otsenka effektivnosti diagnosticheskikh testov na osnove usilennogo ROC analiza*. [Upravlyayushchie sistemy i mashiny], 2009, no. 5, pp. 3–13 (in Russ.).
15. Fawcett T. An introduction to ROC analysis. [Pattern Recognition Letters], 2006, vol. 27, pp. 861–874.
16. Refaeilzadeh P., Tang L., Liu H *Cross Validation*. *Encyclopedia of Database Systems*. New York: Springer, 2009, pp. 532–538.
17. `Scipy.stats.ttest_relvalidation`. Available at: [https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.ttest\\_rel.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.ttest_rel.html) (Accessed: May 13, 2020).

---

**Andrey S. Koltays**

Postgraduate student, Department of Complex Information Security of Electronic Computer Systems (KIBEVS), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-15-29  
Email: kas2@keva.tusur.ru

**Alexandra A. Shatrova**

Student, Department of Information Systems Security (BIS)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-15-29  
Email: shatrovaaleks@gmail.com

**Alexander A. Shelupanov**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, President of TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0003-2393-6701  
Phone: +7 (382-2) 90-71-55  
Email: saa@tusur.ru

УДК 004.891.2

А.Н. Целых, Л.А. Целых, В.С. Васильев

## Обеспечение безопасности сложных систем на основе выявления влияний в графовых моделях

Предлагаются новые математические методы для выявления влияния негативных факторов на обеспечение безопасности функционирования сложных систем. Модель функционирования системы представляет собой направленный взвешенный знаковый граф с причинно-следственными связями на ребрах, называемый нечеткой когнитивной картой. Для выявления влияний в когнитивной графовой модели используется алгоритм эффективных управлений. В результате применения метода выявления влияний формируются наборы компонент вектора влияний и вектора воздействий с требуемым уровнем результативности. Для проверки достоверности полученных результатов предлагается процедура валидации.

**Ключевые слова:** направленные взвешенные графы, нечеткие когнитивные карты, выявление влияний, алгоритм эффективных управлений.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-42-49

Моделирование сложных систем с использованием графов получило широкое распространение ввиду наглядности их представления и наличия многочисленных методов анализа. Основными классами таких систем являются социальные и социально-экономические системы. Представителями первого класса систем являются социальные сети, второй класс представлен нечеткими когнитивными картами (НКК). Вопрос максимизации влияний в анализе графов в последние годы является предметом интенсивных исследований. Основные исследования влияний сосредоточились на выявлении влиятельных узлов в социальных сетях и предназначены для ненаправленных невзвешенных графов. Исследования в области нахождения влиятельных узлов в направленных графах находятся в «детской» стадии [1]. Изучение влияний в системах второго класса представлено отдельными исследованиями. НКК являются направленными взвешенными знаковыми графами с гетерогенными узлами, поэтому нахождение влиятельных узлов в такой модели является сложной задачей.

Выявление критических или особо важных узлов является эффективным способом анализа свойств, структур и функций моделей и используется в разных областях, включая биологию [2], информатику [3–5]. Однако вопросы уязвимости и живучести систем исследовались с точки зрения их технической уязвимости. Как правило, слабые места системы рассматривались как узлы и связи, повреждение которых значительно снижает их производительность [6].

В исследованиях социально-экономических систем известны случаи применения моделей распространения влияний для маркетинговых (вирусный маркетинг), финансовых [7], политических (электоральная политика), социальных (изучение общественного мнения) [8] и других целей. В основном в таких случаях графы этих систем представляют собой сети. В таких сетях узлы характеризуются однородностью своей природы, например, все люди или все акции, или все коммутаторы, и т.п. Было найдено

лишь немного исследований, разрабатывающих методы выявления влияний в области функционирования сложных социально-экономических систем, узлы которых имеют неоднородную природу. В таких системах важность выявления критических узлов имеет еще большее значение, так как не только фатальное повреждение узлов ведет к сбою работы системы, но даже снижение уровня функционирования каких-то важных факторов системы может привести к неожиданным последствиям для всей системы.

Все сложные системы подвергаются опасности нарушения их нормального функционирования, и обеспечение безопасности таких систем является наиболее важным аспектом, который нужно исследовать. Знание ключевых факторов модели может стать основой для создания системы обеспечения безопасности функционирования сложных систем. В системах, имеющих большое количество гетерогенных факторов и большое количество связей между ними, такие факторы являются неочевидными. Поэтому требуется разработка специальных методов.

Решение задачи нахождения значимых факторов в социально-экономических системах также было предложено в теории когнитивного моделирования [9–11]. В основу подхода была положена модель стационарного состояния системы (в терминах технических систем), для которого решается задача сохранения этого состояния (невыхода за его пределы). Поэтому полученные в результате решения, факторы системы являются хоть и значимыми, но отвечающими за сохранение достигнутого состояния системы. Напротив, для социально-экономических систем нормальным состоянием является развитие (рост) системы, т.е. выход из стационарного состояния. Для этого очевидна необходимость разработки других методов выявления влияний для другой модели управления, которая отражает будущее направление развития системы.

Цель данной работы – предложить новую методологию выявления влияний для обеспечения безопасности функционирования сложной системы. Уникальность настоящего исследования заключается

в предложении нового подхода, который основывается на модели развития (роста) системы, учитывает ее целостность, гетерогенность и качественный характер факторов системы.

**Обзор публикаций**

В настоящее время нахождение влияний представлено двумя направлениями: с использованием моделей распространения (диффузии) информации и на основе моделей теории управления.

Основой моделей распространения является информационный характер связи между узлами, что заключается в понятии активного или неактивного состояния узла [12]. Последние исследования дополнены понятием «доверие» [13] и появлением класса «рекомендательных систем» [14]. Предлагаемые методы для сетей, в основном, базируются на топологических характеристиках сети, таких как степень, связность, центральность, близость, взаимность и др. Отсюда возникают различные метрики узлов и ребер вероятностной природы. Однако надо отметить, что эти концепции, положенные в основу распространения влияния в сетях, не характерны для социально-экономических систем. В социальных сетях влияние носит побудительный характер (побуждение к покупке, побуждение присоединения к группе и т.д.), напротив, в социально-экономических системах влияние носит причинно-следственный, принудительный характер.

Использование моделей теории управления основывается на концепции полной управляемости, введенной Калманом в 1960-х гг. для канонической инвариантной по времени линейной системы. В настоящее время эта концепция и понятия были пересмотрены и повторно использованы для направленных сетей и нелинейной динамики [15, 16]. В основе модели лежит контролируемое поведение системы, которое обеспечивается наличием фундаментального представления о ее функционировании в виде уравнения, описывающего поведение системы. Концепция Калмана предполагает устойчивость в терминах технических систем, что невозможно обеспечить для социально-экономических систем.

Таким образом, с одной стороны, применение модели управляемости по Калману ограничено обязательностью наличия функционального уравнения системы, с другой стороны, наличие причинно-следственного характера связей в системе и гетерогенность самих факторов системы делает необходимым разработку другого подхода к выявлению влияний в социально-экономических системах. Эти особенности системы и были положены в основу предлагаемого в нашей работе нового подхода нахождения влиятельных узлов на основе алгоритма эффективных управлений.

Выявление критических узлов связано с выявлением слабых мест системы, что позволяет разрабатывать политику защиты от непредвиденных разрушительных инцидентов. Постановка цели оценки уязвимости сети является элементом обеспечения ее безопасного функционирования.

**Описание метода**

*1. Алгоритм эффективных управлений*

Рассмотрим граф  $G = \langle V, E \rangle$  для социально-экономической системы, где  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$  – множество вершин,  $E \subseteq V \times V$  – множество дуг. Граф определяется матрицей смежности  $A^T = \|a_{ji}\|_{n \times n}$ , где  $a_{ij}$  – вес дуги от вершины  $V_i$  до вершины  $V_j$ ,  $-1 \leq a_{ij} \leq 1$ . Рассматривается задача управления для модели роста с простой зависимостью воздействия и отклика

$$(E - \delta A^T)x = u, \tag{1}$$

где  $E$  – единичная матрица;  $x = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^T$  – вектор влияний, называемый реакцией системы;  $u = (u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n)^T$  – вектор управляющих воздействий,  $\delta$  – демпинг-фактор,  $0 \leq \delta \leq 1$ . Эта задача может быть решена либо относительно воздействий, либо относительно откликов. Мы будем рассматривать решение задачи относительно воздействий.

Чтобы вектор  $u$  принадлежал линейному многообразию, его коэффициенты разложения на векторы  $v_1, v_2, \dots, v_m$  должны быть неотрицательными, тогда мы получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{pmatrix} (v_1, v_1) & (v_1, v_2) & \dots & (v_1, v_m) \\ (v_2, v_1) & (v_2, v_2) & \dots & (v_2, v_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (v_m, v_1) & (v_m, v_2) & \dots & (v_m, v_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_1, u) \\ (v_2, u) \\ \vdots \\ (v_m, u) \end{pmatrix},$$

где  $v_1, v_2, \dots, v_m$  – векторы разложения;  $c_1 \geq 0, c_2 \geq 0, \dots, c_m \geq 0$  – соответствующие коэффициенты разложения;  $u$  – вектор воздействия. Пусть  $V$  – матрица, столбцами которой являются векторы  $v_1, v_2, \dots, v_m$ ; тогда СЛАУ сводится к виду

$$V^T V c = V^T u,$$

где  $C = (c_1 \ c_2 \ \dots \ c_m)^T$  – вектор коэффициентов разложения. Задача нелинейного неквадратичного программирования вдоль оптимального направления имеет вид

$$(V^T V)^{-1} V^T (E - \delta A^T)x \geq 0_m. \tag{2}$$

Имеем

$$\frac{\|x\|^2}{\|u\|^2} = \frac{x^T x}{u^T u} \rightarrow \max, (V^T V)^{-1} V^T (E - \delta A^T)x \geq 0_m, \tag{3}$$

где  $B = (E - \delta A)(E - \delta A^T)$ . В результате преобразований выражение (3) сводится к задаче квадратичного программирования при нелинейных ограничениях

$$x^T B x \rightarrow \min, x^T x = 1, C \geq 0_m,$$

где  $\mathbf{C} = (\mathbf{V}^T \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^T (\mathbf{E} - \delta \mathbf{A}^T)$ . Задача решена в отношении отклика.

Функция Лагранжа для этой задачи имеет вид

$$L = \mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x} + \lambda (1 - \mathbf{x}^T \mathbf{x}) - \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{C} \mathbf{x} \rightarrow \min.$$

Линеаризованная система необходимых условий минимума для модифицированной функции Лагранжа по Бертсекасу [17] с регуляризацией по Тихонову [18] имеет вид

$$\begin{cases} \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{G}} \tilde{\mathbf{y}} + 2(\alpha - \lambda) \mathbf{x}, \\ \tilde{\mathbf{G}}^T \tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{r}}, \end{cases}$$

где  $\mathbf{H} = 2\bar{\mathbf{B}} - 2(\lambda - \alpha)\mathbf{E}$ ,  $\tilde{\mathbf{G}} = (2\mathbf{x} \parallel \tilde{\mathbf{C}}^T)$ ,  
 $\tilde{\mathbf{r}}^T = (1 + \mathbf{x}^T \mathbf{x} \parallel \mathbf{0}_m^T)$ ,  $\mathbf{y}^T = (\hat{\lambda} \parallel \hat{\boldsymbol{\mu}}^T)$ .

На каждой итерации СЛАУ может быть решена с использованием следующего алгоритма.

#### Алгоритм эффективных управлений при общих ограничениях

**Require:**  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ;

**Ensure:**  $\mathbf{x}$ ,  $\lambda$ ,  $\boldsymbol{\mu}$  начальные приближения.

**repeat:**

1: Решить СЛАУ:  $\tilde{\mathbf{T}}_j = \mathbf{H}^{-1} \tilde{\mathbf{G}}_j$  ( $k$ -й столбец  $\tilde{\mathbf{T}}$  является решением СЛАУ с матрицей  $\mathbf{H}$  и правой частью, являющейся  $k$ -м столбцом матрицы  $\tilde{\mathbf{G}}$ );  
 $\mathbf{t}_j = 2(\alpha - \lambda_0) \mathbf{H}^{-1} \mathbf{x}_j$ ;

2: Построить матрицу двойственной задачи  $\tilde{\mathbf{D}}_j = \tilde{\mathbf{G}}_j^T \tilde{\mathbf{T}}_j$  и решить СЛАУ  $\tilde{\mathbf{y}}_j = \tilde{\mathbf{D}}_j^{-1} (\tilde{\mathbf{r}}_j - \tilde{\mathbf{G}}_j^T \mathbf{t}_j)$ ;

3: Решить:  $\tilde{\mathbf{x}}_j = \tilde{\mathbf{T}}_j \tilde{\mathbf{y}}_j + \mathbf{t}_j$ ;

4: Нормализовать отклик  $\hat{\mathbf{x}}_j = \tilde{\mathbf{x}}_j / \|\tilde{\mathbf{x}}_j\|$ , и выразить влияние  $\hat{\mathbf{u}}_j = (\mathbf{E} - \delta \mathbf{A}^T) \hat{\mathbf{x}}_j$ ;

**Output:**  $\mathbf{x}$ ,  $(\mathbf{E} - \delta \mathbf{A}^T) \mathbf{x} = \mathbf{u}$  в порядке убывания.

#### II. Процедура отбора критических узлов

Выявление критических узлов посредством использования алгоритма эффективных управлений требует настройки модели в соответствии с условиями работы факторов исследуемой системы. Алгоритм предоставляет такую возможность для пользователя. Настройка модели заключается в построении системы ограничений на уровне входных данных.

Узлы модели могут находиться в следующих 3 статусах: неуправляемые факторы (например, факторы внешней среды, на которые не может быть оказано непосредственное управляющее воздействие), и факторы, характеристики которых могут иметь только положительный или только отрицательный рост. Например, хорошо известно, что увеличение уровня фактора «усталость персонала» вызывает увеличение фактора «орфографические ошибки». Обратную зависимость трудно себе представить. Поэтому в модели должна предусматриваться соответствующая зависимость, которая обеспечивает правильную реакцию модели и адекватно отражает работу исследуемой системы. Ограничения для входных данных соответственно разделяются на 3 вида:

1. Равенство нулю компонент (воздействий, откликов),  $x_i = 0$ ,  $u_i = 0$ .

2. Неотрицательность компонент (воздействий, откликов),  $x_i \geq 0$ ,  $u_i \geq 0$ .

3. Неположительность компонент (воздействий, откликов),  $x_i \leq 0$ ,  $u_i \geq 0$ .

Процесс отбора влиятельных узлов включает в себя следующие этапы:

*Шаг 1.* Настройка модели посредством построения системы ограничений, отображающей нормальную работу модели. Система ограничений включает: ввод неуправляемых факторов; ввод факторов отрицательного роста; ввод факторов положительного роста.

*Шаг 2.* Запуск алгоритма эффективных управлений [19]. Получение наборов компонент вектора откликов и вектора воздействий для модели, полученной на шаге 1.

*Шаг 3.* Отбор критических узлов посредством задания требуемых значений для совокупных показателей эффективности и обеспечения управляемости ( $r_{ij}^2$  и  $v_{ij}^2$  соответственно) [20].

#### Численный эксперимент

Реализуемость предлагаемого подхода была проверена на примере набора данных реального мира. В качестве тестового примера была взята когнитивная карта банковской устойчивости, представленная Ф. Ферейра и др. в [21]. Графовая модель представлена матрицей смежности размером  $167 \times 167$  с 187 дугами и общим весом 148,9 (рис. 1).

*Шаг 1. Настройка модели посредством построения системы ограничений.*

Так как граф, представляющий НКК, является нестрогим звездным, экспертно было определено, что граф имеет 4 уровня, 3 из которых являются концентраторами, а 1-й уровень представлен первичными факторами модели. 4-й уровень определяется одной вершиной – собственно «Банковская устойчивость», которая является целью графовой модели. Концентраторы 2-го уровня представляют собой коллективные инфраструктурные факторы модели, которые собирают первичные факторы 1-го уровня. И, наконец, вершины 3-го уровня являются проводниками между 2-м уровнем и топ-уровнем (4-м) модели. Из этого представления модели следует, что невозможно оказывать непосредственное воздействие на вершины-концентраторы, так как эти вершины являются составными. К этой группе вершин относятся: 2 – экологическая проблема, 6 – эффективность потребления ресурсов, 34 – социальные проблемы, 50 – человеческие ресурсы, 52 – микрокредиты, 87 – внутренние факторы, 117 – стратегические позиции, 153 – технические возможности управленческой команды, 160 – типы клиентов. Вершины-передатчики, в свою очередь, формируют основные характеристики модели (137 – обязательства перед клиентами, 138 – этические, социальные и экологические факторы, 139 – прозрачность, 140 – ответственность, 141 – подотчетность, 142 – устойчивость рынков и власти, 152 – удовлетворенность клиентов, 167 – доступность информации, 77 – при-

нятие фандрайзинговой стратегии). На эти вершины также прямое воздействие невозможно.

Для рассматриваемой модели факторы 4, 3 и 2-го уровня являются неуправляемыми. Для получения адекватного результата в модели необходимо также выявить факторы, движение характеристик которых должно быть приемлемо. Например, такой фактор как 149 – отмывание денег и финансирование терроризма – не должен получить отклик системы в виде положительного роста. Таких факторов в рассматриваемой модели оказалось семь (30, 33, 53, 54, 55, 149, 159).

Таким образом, модель имеет вышеописанные ограничения и формирует систему ограничений на уровне входных данных. Далее для выполнения численного эксперимента были выбраны следующие варианты систем ограничений:

- 1) система ограничений 1: без ограничений;
- 2) система ограничений 2:

а) равенство нулю компоненты воздействий для вершин 1-го и 3-го уровня,

б) неотрицательность компонент отклика для 7 соответствующих вершин;

3) система ограничений 3:

а) равенство нулю компоненты воздействий для вершин 1, 2 и 3-го уровня,

б) неотрицательность компонент отклика для 7-ми соответствующих вершин;

4) система ограничений 4:

а) равенство нулю компоненты воздействий для вершин 1-го, 2-го и 3-го уровня.

б) неотрицательность компонент отклика для 7 соответствующих вершин,

с) равенство нулю компонент воздействий для всех вершин, кроме вершин, занявших соответственно (1) 1-е место по воздействиям; (2) 1-е и 2-е; (3) 1, и 2 и 3-е места.

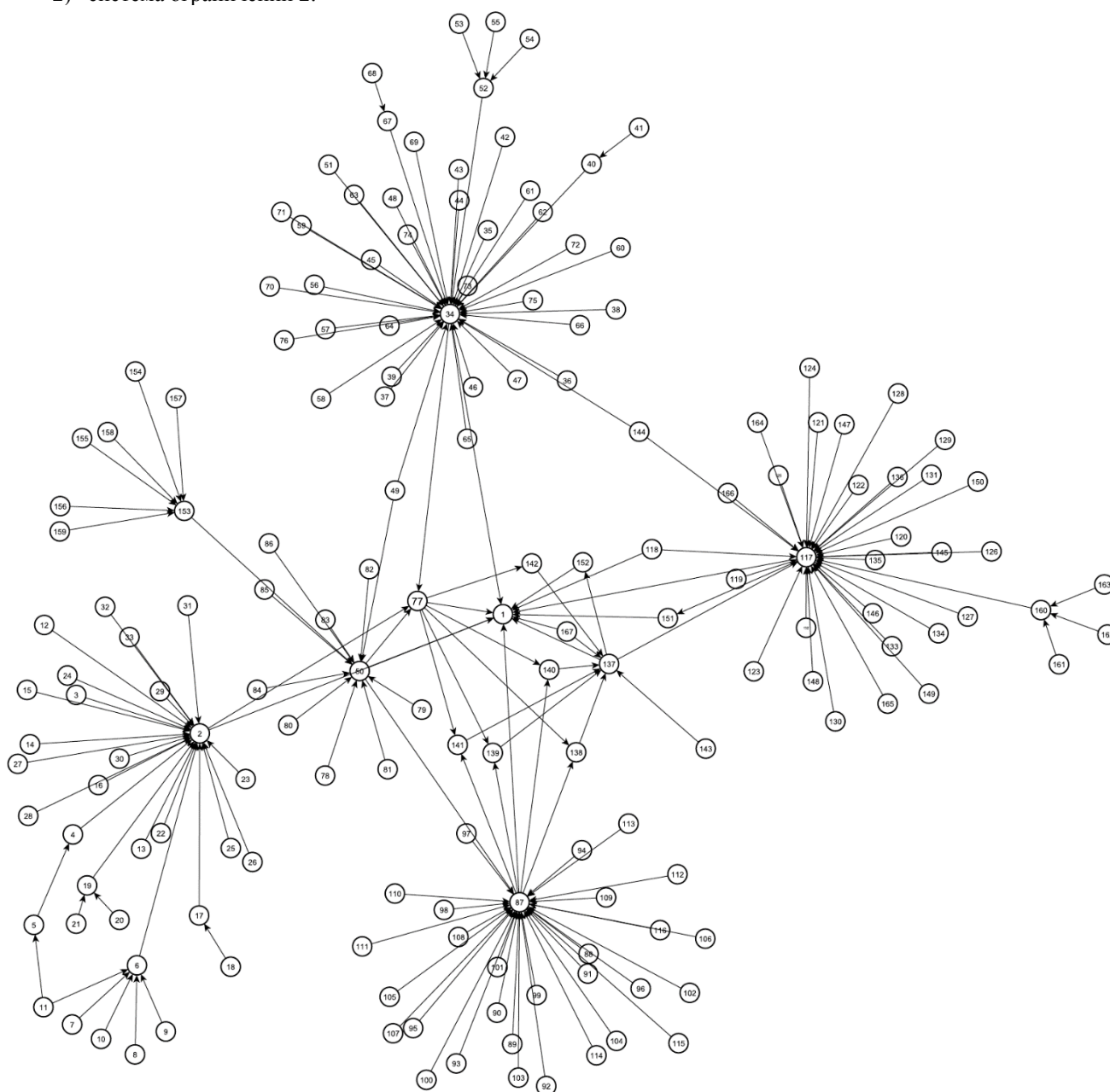


Рис. 1. Нечеткая когнитивная карта устойчивости банкинга

Расчеты с системами ограничений 1 и 2 были выполнены для иллюстрации процесса настройки модели. Система ограничений 3 адекватно отражает работу исследуемой системы «Банковская устойчивость» и используется для расчетов на шагах 2 и 3.

*Шаг 2. Запуск алгоритма эффективных управлений.*

Полученные результаты вычислений приведены в табл. 1. Численный эксперимент для 1-й (концентраторы) и 2-й (проводники) групп ограничений показывает ожидаемое последовательное перемещение этих узлов с первых на вторые и последующие ранги (рис. 2).

Таблица 1

Результаты численного эксперимента в рамках системы ограничений 1 и 2

Уровень вершины	Номер узла	Компоненты вектора воздействий	Уровень вершины	Номер узла	Компоненты вектора воздействий
2	87	0,2408	3	137	0,4319950
2	34	0,2278	3	77	0,3609490
4	1	0,2272	3	138	0,2294120
2	117	0,21	3	140	0,2223830
3	77	0,1975	3	141	0,2204420
3	137	0,1816	3	139	0,2056460
2	50	0,1533	3	142	0,1990910
2	2	0,1159	3	167	0,1650040
3	140	0,1002	3	152	0,1521260
3	138	0,0991	1	143	0,1331640
3	141	0,0959	1	118	0,0534910
3	139	0,0919	1	151	0,0523370
3	167	0,0822	1	144	0,0497490
1	118	0,0781	1	97	0,0423470
1	144	0,0778	1	99	0,0423470
1	151	0,0773	1	104	0,0423470
3	152	0,0684	1	115	0,0423470
1	49	0,0681	1	49	0,0414290
3	142	0,061	1	88	0,0376420
2	52	0,0488	1	89	0,0376420
...	...	...	...	...	...

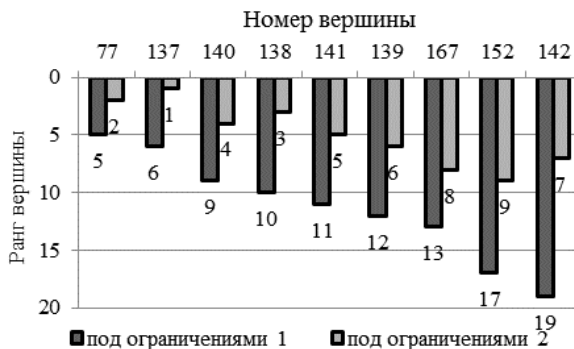


Рис. 2. Ранг вершин в системах ограничений 1 и 2

Если бы мы не ввели такие ограничения, тогда в соответствии с полученными результатами для модели без ограничений, критическими узлами оказались бы узлы, воздействия на которые было бы недоступно: концентраторы – для системы ограниче-

ний 1 и проводники – для системы ограничений 2. Недоступность воздействий на эти узлы обусловлено их неуправляемостью.

*Шаг 3. Отбор критических узлов.*

Компоненты векторов откликов и воздействий, полученные в результате работы алгоритма эффективных управлений, показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты численного эксперимента в соответствии с системой ограничений 4

$v_i$	Компоненты вектора влияния	$v_i$	Компоненты вектора отклика	$r_{ij}^2$	Сумма $r_{ij}^2$
34	0,3394	144	0,20877	0,043585	0,053263
117	0,2223	40	0,15013	0,022539	0,080807
144	0,2088	36	0,14202	0,02017	<b>0,105456</b>
40	0,1554	43	0,14202	0,02017	0,130104
36	0,142	45	0,14202	0,02017	0,154753
43	0,142	69	0,14202	0,02017	0,179401
45	0,142	49	0,13803	0,019052	0,202684
69	0,142	39	0,12624	0,015937	0,222160
151	0,1387	42	0,12624	0,015937	<b>0,241635</b>
49	0,138	44	0,12624	0,015937	0,261111
67	0,1292	46	0,12624	0,015937	0,280586
39	0,1262	47	0,12624	0,015937	0,300061
42	0,1262	48	0,12624	0,015937	0,319537
44	0,1262	57	0,12624	0,015937	0,339012
46	0,1262	70	0,12624	0,015937	0,358487
47	0,1262	71	0,12624	0,015937	0,377963
48	0,1262	72	0,12624	0,015937	0,397438
57	0,1262	74	0,12624	0,015937	0,416914
70	0,1262	75	0,12624	0,015937	0,436389
71	0,1262	67	0,12578	0,015821	0,455723
72	0,1262	151	0,1187	0,01409	0,472941
74	0,1262	118	0,11594	0,013442	0,489368
75	0,1262	35	0,11046	0,012201	<b>0,504279</b>
...	...	...	...	...	...

Отбор критических узлов производился для значений параметров управляемости:  $\sim 0,105$ ,  $\sim 0,242$ ,  $\sim 0,504$  (выделено жирным и подчеркиванием в табл. 2). Соответственно, из 167 узлов, составляющих полную модель, в 1-й группе находились 3 узла (1,8% от всех узлов), во 2-й – 9 узлов (5,39%), в 3-й – 23 узла (13,8%). Далее был произведен анализ полученного результата. Были выполнены расчеты алгоритмом эффективных управлений для этих 3 отобранных групп узлов. Результаты численных экспериментов для системы ограничений 4 приведены в табл. 3.

В целом картина полученных откликов показывает важность ментального представления модели исследуемой системы. Для нашего случая, как показано в статье [21], самым важным узлом признан 34-й узел (см. табл. 2), что и отразилось в результатах численного эксперимента. Это показывает, что требуется валидация модели перед запуском процесса отбора критических узлов.

Таким образом, полученный результат выражает возможность выявления критических узлов для управления работой системы в целом.

Таблица 3

## Результаты численного эксперимента в соответствии с системой ограничений 4

№ сценария	Система ограничений	Значение продуктивности влияния ( $I_p$ )	$1/\lambda_i$
Модель <i>a</i>	При ограничениях 3	1,0 (для базового вектора)	1,222051
Модель <i>b</i>	При ограничениях 4-1	0,354	1,022772
Модель <i>c</i>	При ограничениях 4-2	0,518	1,065857
Модель <i>d</i>	При ограничениях 4-3	0,713	1,140560

**Обсуждение результатов**

Оценка результатов идентификации и отбора влиятельных вершин является сложной задачей. Поскольку нет объективной истины, трудно рассчитать эффективность полученных решений относительно производительности влияния этих отобранных влиятельных вершин.

Для оценки предлагаемой модели используются следующие критерии:

1. *Производительность*. Поскольку результатами работы алгоритма являются компоненты вектора эффективного управления при разных ограничениях, мы предлагаем использовать меру производительности влияния как проекцию оцениваемого вектора на базовый вектор. Под базовым вектором будем понимать вектор эффективного управления при наличии ограничений, обеспечивающих адекватную работу модели.

*Определение 1.* Продуктивность влияния ( $I_p$ ) есть степень соответствия общей направленности системы

$$I_p = \text{proj}_{\mathbf{a}} \mathbf{b},$$

где  $\mathbf{a}$  – базовый вектор (вектор без ограничения воздействий);  $\mathbf{b}$  – вектор с ограничениями воздействий на вершины.

В теории эффективных управлений система рассматривается с точки зрения собственного значения матрицы смежности ориентированного взвешенного знакового графа. Под направленностью системы мы понимаем проекцию собственного вектора, соответствующего минимальному собственному числу матрицы квадратичной формы на множество допустимых решений, определяемое набором ограничений. Эта мера учитывает направленность системы в целом и определяется как проекция оцениваемого вектора на базовый вектор. Данная мера обеспечивается собственными значениями матрицы смежности, которая лежит в основе предлагаемого алгоритма.

В нашем примере влияние вектора для модели *a* с ограничениями 2 (см. табл. 3) есть базовый вектор, обеспечивающий адекватную работу системы. Соответственно, векторы влияния для модели *b*, модели *c* и модели *d* есть векторы с ограничением воздействий. Анализ полученных результатов показывает,

что ~1,8% вершин (3/167) дают 35,4%, ~5,4% вершин (9/167) дают 51,8% и ~13,8% вершин (23/167) дают 71,3% отклика системы. Таким образом, необходимо и достаточно контролировать небольшое количество факторов, чтобы не допустить фатального сбоя работы системы и гарантировать движение (развитие) системы в нужном направлении.

2. *Применимость для предметной области*. Алгоритм эффективных управлений основан на спектральных свойствах матричного представления направленных взвешенных знаковых графов, представляющих НКК социально-экономических систем. Метод не накладывает ограничений на направленность ребер, на знак и диапазон значений весов на ребрах.

3. *Форма представления результатов*. Результаты представляются для лица, принимающего решение (эксперта), в виде упорядоченных в порядке убывания значений компонент откликов и воздействий. Процесс отбора чрезвычайно прост и осуществляется на основе выбора заданного значения продуктивности влияния.

**Заключение**

В данной статье рассматривается проблема процесса отбора критических узлов в графовой модели исследуемой системы и рассматривается валидация полученного результата. Основным вкладом этой работы является методология выявления влияния и отбора на этой основе критических узлов для обеспечения безопасности функционирования сложной системы с простым и понятным способом оценки продуктивности влияния. Выявление влиятельных осуществляется посредством алгоритма эффективных управлений на модели, представленной в виде направленного взвешенного знакового графа с причинно-следственными отношениями на ребрах. Граф представляет собой НКК исследуемой системы. Передачу влияний отражает модель развития (роста) системы. Применение предлагаемой методологии может содействовать принятию решений в отношении направленных воздействий, поддерживающих безопасное функционирование системы. Реализация такого инструмента в информационно-аналитических системах безопасности будет способствовать повышению надежности таких систем.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-01-00109.

*Литература*

1. Influence analysis in social networks: A survey / S. Peng, Y. Zhou, L. Cao, S. Yu, J. Niu, W. Jia // Journal of Network and Computer Applications. – 2018. – Vol. 106. – P. 17–32.
2. Studying Connectivity Properties in Human Protein–Protein Interaction Network in Cancer Pathway / V. Tomaino, A. Arulselvan, P. Veltri, P. M. Pardalos // Data Mining for Biomarker Discovery. – Boston, MA: Springer, 2012. – P. 187–197.
3. Dinh T.N. Precise structural vulnerability assessment via mathematical programming / T.N. Dinh, M.T. Thai. –



2011. – MILCOM–2011. Military Communications Conference (IEEE). – Baltimore, Md.: IEEE, 2011. – P. 1351–1356.

4. On the Discovery of Critical Links and Nodes for Assessing Network Vulnerability / S. Yilin, N.P. Nguyen, X. Ying, M.T. Thai // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2013. – Vol. 21, No. 3. – P. 963–973.

5. Boginski V. Identifying Critical Nodes in Protein-Protein Interaction Networks / V. Boginski, C. W. Commander // Clustering Challenges in Biological Networks. – Singapore: World Scientific Publishing Company, 2009. – P. 153–167.

6. Lalou M. The Critical Node Detection Problem in networks: A survey / M. Lalou, M.A. Tahraoui, H. Khedouci // Computer Science Review. – 2018. – Vol. 28. – P. 92–117.

7. Nagurney A. Identification of Critical Nodes and Links in Financial Networks with Intermediation and Electronic Transactions / A. Nagurney, Q. Qiang // Computational Methods in Financial Engineering. – Berlin: Springer, 2008. – P. 273–297.

8. Punishment diminishes the benefits of network reciprocity in social dilemma experiments / X. Li, M. Jusup, Z. Wang, H. Li, L. Shi, B. Podobnik, H.E. Stanley, S. Havlin, S. Boccaletti. // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2018. – Vol. 115, No. 1. – P. 30–35.

9. Kosko B. Fuzzy cognitive maps // International Journal of Man-Machine Studies. – 1986. – Vol. 24, No. 1. – P. 65–75.

10. Pedrycz W. Fuzzy Control and Fuzzy Systems. – New York: John Wiley & Sons, 1993. – 368 p.

11. Roberts F. Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems. – New Jersey, USA: Prentice Hall Press, 1997. – 560 p.

12. Arruda de G.F. Fundamentals of spreading processes in single and multilayer complex networks / G.F. de Arruda, F.A. Rodrigues, Y. Moreno // Physics Reports. – 2018. – Vol. 756. – P. 1–59.

13. Jøsang A. A survey of trust and reputation systems for online service provision / A. Jøsang, R. Ismail, C. Boyd. // Decision Support Systems. – 2007. – Vol. 43, No. 2. – P. 618–644.

14. Fuzzy Group Decision Making for influence-aware recommendations / N. Capuano, F. Chiclana, E. Herrera-Viedma, H. Fujita, V. Loia // Computers in Human Behavior. – 2019. – Vol. 101. – P. 371–379.

15. Studies on controllability of directed networks with extremal optimization / J. Ding, Y.-Z. Lu, J. Chu // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2013. – Vol. 392, No. 24. – P. 6603–6615.

16. Cai N. On quantitatively measuring controllability of complex networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2017. – Vol. 474. – P. 282–292.

17. Bertsekas D.P. Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods. – Belmont, MA: Athena Scientific, 1996. – 410 p.

18. Tikhonov A. Solutions of Ill-Posed Problems / A. Tikhonov, V. Arsenin. – New York: Wiley, 1977. – 272 p.

19. Tselykh A. Management of Control Impacts Based on Maximizing the Spread of Influence / A. Tselykh, V. Vasilev, L. Tselykh // International Journal of Automation and Computing. – 2019. – Vol. 16, No. 3. – P. 341–353.

20. Method Maximizing the Spread of Influence in Directed Signed Weighted Graphs / A.A. Tselykh, V.S. Vasilev, L.A. Tselykh, S.A. Barkovskii // Advances in Electrical and Electronic Engineering. – 2017. – Vol. 15, No. 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://advances.utc.sk/index.php/AEEE/article/view/1950>, свободный (дата обращения: 25.06.2020).

21. Ferreira F.A.F. Integrating qualitative comparative analysis (QCA) and fuzzy cognitive maps (FCM) to enhance the selection of independent variables / F.A.F. Ferreira, M.S. Jalali, J.J.M. Ferreira // Journal of Business Research. – 2016. – Vol. 69, No. 4. – P. 1471–1478.

#### Цельх Александр Николаевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. информационно-аналитических систем безопасности (ИАСБ) Южного федерального университета (ЮФУ) Некрасовский пер., д. 44, г. Таганрог, Россия, 347928  
ORCID 0000-0001-6956-5315  
Тел.: +7 (863-4) 37-17-43  
Эл. почта: ant@sfedu.ru

#### Цельх Лариса Анатольевна

Канд. экон. наук, доцент Таганрогского института им. А.П. Чехова (ф-ла) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ) Инициативная ул., д. 48, г. Таганрог, Россия, 347936  
ORCID 0000-0001-5663-1563  
Тел.: +7 (863-4) 37-68-37  
Эл. почта: l.tselykh58@gmail.com

#### Васильев Владислав Сергеевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент ЮФУ Некрасовский пер., д. 44, г. Таганрог, Россия, 347928  
ORCID 0000-0001-7485-8614  
Тел.: +7 (863-4) 37-17-43  
Эл. почта: vsvasilev@sfedu.ru

Tselykh A.N., Tselykh L.A., Vasilev V.S.

#### Providing security for complex systems based on influence detection in graph models

The article offers new mathematical methods for detecting the influence of negative factors on the security of complex systems. The system's functioning model is an oriented weighted sign graph with cause-and-effect relationships at the edges, called a fuzzy cognitive map. An effective control algorithm is used to identify impacts in the cognitive Graph model. As a result of using the influence detection method, sets of components of the influence vector and the impact vector with the required level of efficiency are formed. To verify the reliability of the results obtained, a validation procedure is proposed.

**Keywords:** directional weighted graphs, fuzzy cognitive maps, influence detection, effective control algorithm.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-42-49

#### References

1. Peng S., Zhou Y., Cao L., Yu S., Niu J., Jia W. Influence analysis in social networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, vol. 106, pp. 17–32.
2. Tomaino V., Arulselvan A., Veltri P., Pardalos P.M. Studying Connectivity Properties in Human Protein-Protein Interaction Network in Cancer Pathway. *Data Mining for Biomarker Discovery*. Boston, MA, Springer, 2012, pp. 187–197.
3. Dinh T.N., Thai M.T. Precise structural vulnerability assessment via mathematical programming. *2011 – MILCOM 2011 Military Communications Conference (IEEE)*. Baltimore, Md., IEEE, 2011, pp. 1351–1356.
4. Yilin S., Nguyen N.P., Ying X., Thai M.T. On the Discovery of Critical Links and Nodes for Assessing Network

Vulnerability. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2013, vol. 21, no. 3, pp. 963–973.

5. Boginski V., Commander C.W. Identifying Critical Nodes in Protein-Protein Interaction Networks. *Clustering Challenges in Biological Networks*. Singapore, World Scientific Publishing Company, 2009, pp. 153–167.

6. Lalou M., Tahraoui M.A., Kheddouci H. The Critical Node Detection Problem in networks: A survey. *Computer Science Review*, 2018, vol. 28, pp. 92–117.

7. Nagurney A., Qiang Q. Identification of Critical Nodes and Links in Financial Networks with Intermediation and Electronic Transactions. *Computational Methods in Financial Engineering*. Berlin, Springer, 2008, 425 p., pp. 273–297.

8. Li X., Jusup M., Wang Z., Li H., Shi L., Podobnik B., Stanley H.E., Havlin S., Boccaletti S. Punishment diminishes the benefits of network reciprocity in social dilemma experiments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, vol. 115, no. 1, pp. 30–35.

9. Kosko B. Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1986, vol. 24, № 1, pp. 65–75.

10. Pedrycz W. *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*. New York, John Wiley & Sons, 1993, 368 p.

11. Roberts F. *Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems*. New Jersey, USA, Prentice Hall Press, 1997, 560 p.

12. de Arruda G.F., Rodrigues F.A., Moreno Y. Fundamentals of spreading processes in single and multilayer complex networks. *Physics Reports*, 2018, vol. 756, pp. 1–59.

13. Jøsang A., Ismail R., Boyd C. A survey of trust and reputation systems for online service provision. *Decision Support Systems*, 2007, vol. 43, no. 2, pp. 618–644.

14. Capuano N., Chiclana F., Herrera-Viedma E., Fujita H., Loia V. Fuzzy Group Decision Making for influence-aware recommendations. *Computers in Human Behavior*, 2019, vol. 101, pp. 371–379.

15. Ding J., Lu Y.-Z., Chu J. Studies on controllability of directed networks with extremal optimization. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2013, vol. 392, no. 24, pp. 6603–6615.

16. Cai N. On quantitatively measuring controllability of complex networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, vol. 474, pp. 282–292.

17. Bertsekas D.P. *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Belmont, MA, Athena Scientific, 1996, 410 p.

18. Tikhonov A., Arsenin V. *Solutions of Ill-Posed Problems*. New York, Wiley, 1977, 272 p.

19. Tselykh A., Vasilev V., Tselykh L. Management of Control Impacts Based on Maximizing the Spread of Influence. *International Journal of Automation and Computing*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 341–353.

20. Tselykh A.A., Vasilev V.S., Tselykh L.A., Barkovskii S.A. Method Maximizing the Spread of Influence in Directed Signed Weighted Graphs. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2017, vol. 15, no. 2, Available at: <http://advances.utc.sk/index.php/AEEE/article/view/1950>, (Accessed: June 25, 2020).

21. Ferreira F.A.F., Jalali M.S., Ferreira J.J.M. Integrating qualitative comparative analysis (QCA) and fuzzy cognitive maps (FCM) to enhance the selection of independent variables. *Journal of Business Research*, 2016, vol. 69, no. 4, pp. 1471–1478.

---

#### Alexander N. Tselykh

Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Department of Information and Analytical Security Systems  
Institute of Computer Technologies and Information Safety  
Southern Federal University  
44, Nekrasovsky st., Taganrog, Russia, 347928  
ORCID 0000-0001-6956-5315  
Phone: +7 (863-4) 37-17-43  
Email: ant@sfedu.ru

#### Larisa A. Tselykh

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor  
Department of Economics and Business  
Chekhov Taganrog Institute  
Rostov State University of Economics  
48, Initsiativnaya st., Taganrog, Russia, 347900  
ORCID 0000-0001-5663-1563  
Phone: +7 (863-4) 37-68-37  
Email: l.tselykh58@gmail.com

#### Vladislav S. Vasilev

Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor  
Department of Information and Analytical Security Systems  
Institute of Computer Technologies and Information Safety  
Southern Federal University  
44, Nekrasovsky st., Taganrog, Russia, 347928  
ORCID 0000-0001-7485-8614  
Phone: +7 (863-4) 37-17-43  
Email: vsvasilev@sfedu.ru

УДК 004.89

А.В. Куртукова, Е.Е. Сваровская, А.С. Романов

## Оценка влияния обфускации на процесс идентификации автора программного кода

Различные способы запутывания исходного кода могут снизить эффективность применяемых моделей идентификации автора программного кода до случайного угадывания. Данная статья посвящена оценке влияния факта обфускации исходного кода на процесс идентификации автора программы при помощи модели гибридной нейронной сети. В рамках исследования были проведены эксперименты как с интерпретируемыми, так и с компилируемыми языками программирования. Полученные результаты свидетельствуют об устойчивости предложенной ранее модели гибридной нейронной сети к обфускации и возможности ее применения для решения поставленной задачи.

**Ключевые слова:** автор, исходный код, обфускация, нейронная сеть, машинное обучение.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-50-54

Обфускация исходного кода программы [1–6] представляет собой процесс, направленный на запутывание текста программы, написанной на каком-либо языке программирования. Наиболее распространенной областью применения обфускации является защита программного кода от плагиата, все чаще встречающегося в сфере коммерческой разработки программного обеспечения (ПО) ввиду активного развития информационных технологий. Разработчики ПО выполняют запутывание кода с помощью специальных инструментов, намеренно делая код трудным для понимания. Однако нельзя исключать также и возможность их применения для сокрытия уникальных приемов, привычек и стиля написания кода, а следовательно, для анонимизации автора программы. Так, авторы-вирусосописатели нередко прибегают к обфускации именно с этой целью. В таких ситуациях экспертный анализ исходного кода вручную становится невозможным и возникает необходимость в использовании технических средств идентификации автора исходного кода программы, устойчивых к запутыванию исходного кода.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных задаче определения автора исходного кода, тема обфускации в них практически не освещена.

Единственная работа, учитывающая влияние обфускации на идентификацию автора исходного кода, написана группой ученых из Дрексельского университета [7]. Для решения задачи классификации они используют подход на основе рекуррентной нейронной сети (НС), случайного леса и TF-IDF представлений. Авторы рассмотрели влияние обфускатора Tiggers [8], предназначенного для языка программирования C, на идентификацию автора исходного кода. Исходная точность определения автора составляла 93,65%, а точность на обфусцированных данных – 58,33%. Результаты позволяют сделать вывод о негативном влиянии обфускации на точность методов определения авторства исходного кода. Это обусловлено тем, что признаки, на основе которых модель принимает решение, теряют свою информативность вследствие переименования,

шифрования и других преобразований кода, применяемых для сокрытия авторской личности.

Таким образом, была поставлена цель – оценить влияние обфусцированных исходных кодов на процесс идентификации автора программного кода моделью гибридной НС (HNN), представленной авторами в работах [9, 10].

### Экспериментальный набор данных

Обфускация исходного кода является особо востребованной для интерпретируемых языков программирования, то есть для языков, где операторы транслируются и выполняются последовательно друг за другом. Это обусловлено тем, что программы на таких языках представляют собой скрипт-программный сценарий, описывающий последовательность действий, выполняющийся интерпретатором, а не исполняемый машинный код, зачастую сложнее поддающийся анализу, как в случае с компилируемыми языками.

В рамках данного исследования было решено провести эксперимент для обфусцированных исходных кодов, написанных как на интерпретируемых языках (Python, PHP, JavaScript), так и на компилируемых языках (C, C++). Информация о наборе данных представлена в табл. 1.

Таблица 1

### Экспериментальная база

Язык	Количество кодов	Количество авторов	Средняя длина, символов
PHP	17 158	80	374
JavaScript	18 735	69	397
Python	16 783	57	532
C	17 274	62	1 162
C++	12 366	72	988

В качестве обфускаторов были выбраны свободно доступные на хостинге IT-проектов Github [11] реализации, подходящие для автоматизированного запутывания большого количества исходных кодов. Для каждого языка программирования необходимо было использовать отдельный инструмент обфускации, учитывающий его особенности.

Для обфускации исходных кодов, написанных на JavaScript, использовался «JS Obfuscator Tool» [12]. Принцип его действия состоит в лексическом преобразовании, замене имен функций и переменных, удалении комментариев и пробельных символов. Кроме того, выполняется конвертирование строк в шестнадцатеричные последовательности и их дальнейшее кодирование в base64.

Еще один обфускатор, применяемый для JavaScript, – «JS-obfuscator» [13]. Действия, выполняемые им, аналогичны [12]. Помимо этого, он осуществляет запутывание встраиваемого HTML, PHP и другого кода.

В качестве одного из инструментов обфускации исходных кодов на Python применялся «Opy» [14], производящий простую лексическую обфускацию. Он выполняет замену имен функций и переменных на последовательности символов «!» и «!», а также преобразует строки в наборы случайных символов.

Как альтернативный инструмент использовался обфускатор «Pyarmor» [15], осуществляющий запутывание на более высоком, чем [14], уровне. Обфускация происходит в процессе исполнения байт-кода каждого объекта, а очистка локальных переменных происходит сразу по окончании выполнения функции.

Для исходных кодов на языке PHP были использованы лексические обфускаторы «Yakpro-go» [16] и «PHP Obfuscator» [17]. Оба удаляют пробельные символы и комментарии. Помимо этого, [17] осуществляет скремблирование имен переменных, методов, классов и пр., а также замену условных операторов на конструкцию «if ... go».

Для языка C++ было решено использовать инструмент «C++ Guard» [18]. Данный обфускатор удаляет как однострочные, так и многострочные комментарии, дополняет исходный код псевдосложным «мусорным» кодом, не влияющим на вычислительную сложность программы, удаляет пробелы и символы переводов строк. Также он обрабатывает все препроцессорные директивы, используя объявления и однострочные «else» условия, и заменяет строки на их шестнадцатеричное представление.

Для исходных кодов на языке C применялся «AnalyseC» [19], выполняющий простые преобразования в виде замены имен переменных на последовательности случайных символов.

### Гибридная нейронная сеть

В рамках данного исследования было решено использовать авторскую модель HNN (рис. 1), отличающуюся особенно высокой точностью для решения проблемы идентификации автора исходного кода. Данная модель представляет собой НС, состоящую из сверточных и рекуррентных слоев, а также слоев прямого распространения. Сверточная часть, реализованная по типу архитектуры Inception-V1 [20], включает в себя фильтры различных размерностей, что позволяет выделять как локальные, так и глобальные информативные признаки из текстовой последовательности. Рекуррентная часть, представленная слоем двунаправленной GRU [21], в свою

очередь, осуществляет выявление временных зависимостей, встречающихся в прямом и обратном контекстах.

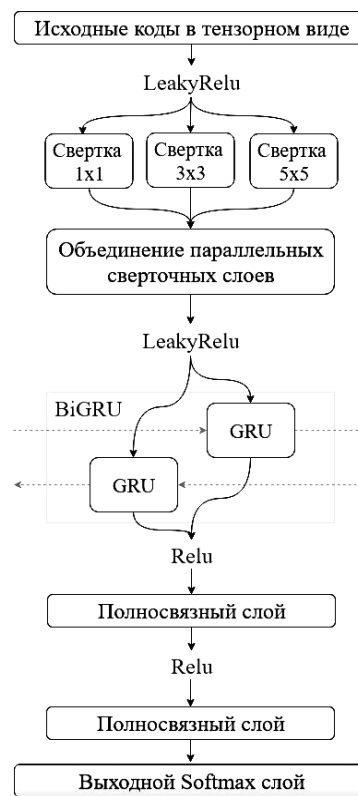


Рис. 1. Модель HNN

### Постановка эксперимента и результаты

Существует несколько способов для идентификации автора обфусцированного исходного кода. Один из них – деобфускация, т.е. установление механизма, при помощи которого был запутан исходный код, и его применение для восстановления первоначального вида кода. Другой способ заключается в извлечении устойчивых к запутыванию функций, изменение которых неизбежно повлечет за собой нарушение работоспособности программы. Однако эта задача является нетривиальной. Поиск и выявление таких функций требуют проведения серьезного исследования для каждого из интересующих языков программирования, так как неправильный их выбор может негативно сказаться на процессе идентификации. Наконец, данная задача может быть решена с помощью НС. В частности, глубокие архитектуры могут обучаться на данных независимо от вида их представления и реагировать на признаки, заведомо неизвестные даже эксперту. Подходящей для решения данной задачи является описанная в предыдущем разделе авторская модель HNN.

Для каждого языка программирования были выбраны корпуса, включающие в себя исходные коды, написанные 5, 10 и 20 авторами. Все исходные коды были обфусцированы соответствующими инструментами, описанными в предыдущем разделе. Оценка точности идентификации осуществлялась с помощью перекрестной проверки по 5 блокам.

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 2 и содержат измерения как до обфускации исходных кодов, так и после.

Таблица 2  
Результаты экспериментов с архитектурами

Язык	Обфускация	Количество авторов		
		5	10	20
JavaScript	Без обфускации, %	92	82	76
	JS Obfuscator Tool [12], %	86	80	70
	JS-obfuscator [13], %	86	70	63
Python	Без обфускации, %	95	92	91
	Ору [14], %	87	80	48
	Pyarmor [15], %	70	54	38
PHP	Без обфускации, %	92	89	86
	Yakpro-po [16], %	89	76	63
	PHP Obfuscator [17], %	82	74	61
C++	Без обфускации, %	92	92	90
	C++ Obfuscator [18]	71	67	41
C	Без обфускации, %	96	95	94
	C Obfuscator [19], %	90	81	76

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод об устойчивости авторской модели HNN к лексической обфускации: удалению пробельных символов, преобразованию строк, их конвертированию и кодированию и т.д.

Точность идентификации автора лексически запутанного исходного кода оказывается ниже в среднем на 7%, чем исходного экземпляра. Однако в случае более сложной обфускации, выполняемой такими инструментами, как [15] и [18], где происходит запутывание байт-кода объектов, дополнение исходного кода псевдосложным кодом и др., разность в точности идентификации достигает 30%.

#### Заключение

В данной статье была произведена оценка влияния обфускации на процесс идентификации автора исходного кода программы при помощи авторской модели HNN.

В рамках исследования были проведены эксперименты с интерпретируемыми (JavaScript, Python, PHP) и компилируемыми (C, C++) языками программирования. С целью запутывания исходных кодов были использованы свободно распространяемые лексические обфускаторы.

Для всех 5 языков точность идентификации автора исходного кода после обфускации оказалась приемлемой и составила в среднем 87%, что оказалось всего на 8% ниже исходной точности.

Таким образом, можно назвать модель HNN устойчивой к простой лексической обфускации, которая может быть выполнена программистом как вручную, так и с использованием свободно распространяемых решений, и применимой при условии небольшого количества предполагаемых авторов наряду с другими инструментами интеллектуально-го анализа текста [22].

Исследование проводится при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 334ГУЦЭС8-Д3/56686 от 27.12.2019 г.

#### Литература

1. Popa M. Techniques of Program Code Obfuscation for Secure Software // Journal of Mobile, Embedded and Distributed Systems. – 2011. – No. 3. – P. 205–219.
2. Popa M. Characteristics of Program Code Obfuscation for Reverse Engineering of Software // Proceedings of the 4th International Conference on Security for Information Technology and Communications. – 2011. – P. 103–112.
3. The Effectiveness of Source Code Obfuscation: An Experimental Assessment / M. Ceccato., M. Di Penta, J. Nagra, P. Falcarin, F. Ricca, M. Torchiano, P. Tonella // 2009 IEEE 17th International Conference on Program Comprehension. – 2009. – P. 178–187.
4. Anckaert B. Program obfuscation: a quantitative approach / B. Anckaert, M. Madou, B.D. Sutter, B.D. Bus, K.D. Bosschere, B. Preneel // In QoP '07: Proc. of the 2007 ACM Workshop on Quality of protection. – 2007. – P. 15–20.
5. Assessment of Source Code Obfuscation Techniques / A. Viticchié, L. Regano, M. Torchiano, C. Basile, M. Ceccato, P. Tonella, R. Tiella // 2016 IEEE 16th International Working Conference on Source Code Analysis and Manipulation (SCAM). – 2016. – P. 11–20.
6. Буинцев Д.Н. Анализ применения запутывающих преобразований для программного обеспечения / Д.Н. Буинцев, А.А. Шелупанов, О.О. Шевцова // Вопросы защиты информации. – 2005. – № 3. – С. 38–43.
7. Caliskan-Islam A. De-anonymizing programmers via code stylometry / A. Caliskan-Islam, R. Harang, A. Liu // Proceedings of the 24th USENIX Security Symposium. – 2015. – P. 255–270.
8. The tigress diversifying c virtualizer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tigress.cs.arizona.edu>, свободный (дата обращения: 12.04.2020).
9. Куртукова А.В. Идентификация автора исходного кода методами машинного обучения / А.В. Куртукова, А.С. Романов // Труды СПИИРАН. – 2019. – № 18(3). – С. 741–765.
10. Kurtukova A. De-Anonymization of the Author of the Source Code Using Machine Learning Algorithms / A. Kurtukova, A. Romanov, A. Fedotova // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – 2019. – P. 0612–0617.
11. Github [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/>, свободный (дата обращения: 13.04.2019).
12. JS Obfuscator Tool [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://obfuscator.io/>, свободный (дата обращения: 26.02.2020).
13. JS-obfuscator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/caiguanhao/js-obfuscator>, свободный (дата обращения: 26.02.2020).
14. Ору [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/QQuick/Ору>, свободный (дата обращения: 26.02.2020).
15. Pyarmor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/dashingsoft/pyarmor>, свободный (дата обращения: 26.02.2020).
16. Yakpro-po [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/pk-fr/yakpro-po>, свободный (дата обращения: 26.02.2020).
17. PHP Obfuscator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/naneau/php-obfuscator>, свободный (дата обращения: 26.02.2020).
18. Cpp Guard [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/techtocore/Cpp-Guard> (дата обращения: 26.02.2020).

19. AnalyseC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/ryarnyah/AnalyseC> (дата обращения: 26.02.2020).

20. Going deeper with convolutions / C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, A. Rabinovich // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2015. – P. 1–9.

21. Mangal S. LSTM vs. GRU vs. Bidirectional RNN for script generation / S. Mangal, J. Poorva, M. Rahul // A Review of Research Topics, Venues, and Top Cited Papers. – 2019. – ArXiv abs/1908.04332.

22. Романов А.С. Обобщенная методика идентификации автора неизвестного текста / А.С. Романов, А.А. Шелупанов, С.С. Бондарчук // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 1(21), ч. 1. – С. 108–112.

2. Popa M. Characteristics of Program Code Obfuscation for Reverse Engineering of Software. *Proceedings of the 4th International Conference on Security for Information Technology and Communications*, 2011, pp. 103–112.

3. Ceccato M., Di Penta M., Nagra J., Falcarin P., Ricca F., Torchiano M., Tonella P. The Effectiveness of Source Code Obfuscation: An Experimental Assessment. *2009 IEEE 17th International Conference on Program Comprehension*, 2009, pp. 178–187.

4. Anckaert B., Madou M., Sutter B.D., Bus B.D., Bosschere K.D., Preneel B. Program obfuscation: a quantitative approach. *In QoP '07: Proc. of the 2007 ACM Workshop on Quality of Protection*, 2007, pp. 15–20.

5. Viticchié A., Regano L., Torchiano M., Basile C., Ceccato M., Tonella P., Tiella R. Assessment of Source Code Obfuscation Techniques. *2016 IEEE 16th International Working Conference on Source Code Analysis and Manipulation (SCAM)*, 2016, pp. 11–20.

6. Buintsev D.N., Shelupanov A.A., Shevtsova O.O. *Analiz primeneniya zaputyvayushchih preobrazovaniy dlya programmnogo obespecheniya* [Analysis of the use of obfuscating transformations for software]. *Voprosy zashchity informacii [Information Security Issues]*, 2015, vol. 3, pp. 38–43.

7. Caliskan-Islam A., Harang R., Liu A. Deanonymizing programmers via code stylometry. *Proceedings of the 24th USENIX Security Symposium*, 2015, pp. 255–270.

8. The tigress diversifying c virtualizer. Available at: <http://tigress.cs.arizona.edu> (Accessed: April 12, 2020).

9. Kurtukova A.V., Romanov A.S. [Identification author of source code by machine learning methods]. *SPIIRAS Proceedings*, 2019, vol. 18, no. 3. pp. 741–765. (In Russ.).

10. Kurtukova A., Romanov A., Fedotova A. De-Anonymization of the Author of the Source Code Using Machine Learning Algorithms. *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, 2019, pp. 0612–0617.

11. Github Available at: <https://github.com/> (Accessed: April 12, 2020).

12. JS Obfuscator Tool. Available at: <https://obfuscator.io/> (Accessed: April 12, 2020).

13. JS-obfuscator. Available at: <https://github.com/caiguanhao/js-obfuscator> (Accessed: April 12, 2020).

14. Pyarmor. Available at: <https://github.com/dashingsoft/pyarmor> (Accessed: April 12, 2020).

15. Opy. Available at: <https://github.com/QQuick/Opy> (Accessed: April 12, 2020).

16. Yakpro-po. Available at: <https://github.com/pkfr/yakpro-po> (Accessed: April 12, 2020).

17. PHP Obfuscator. Available at: <https://github.com/naneau/php-obfuscator> (Accessed: April 12, 2020).

18. Cpp Guard. Available at: <https://github.com/techtocore/Cpp-Guard> (Accessed: April 12, 2020).

19. AnalyseC. Available at: <https://github.com/ryarnyah/AnalyseC> (Accessed: April 12, 2020).

20. Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A. Going deeper with convolutions. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 1–9.

21. Mangal S., Poorva J., Rahul M. LSTM vs. GRU vs. Bidirectional RNN for script generation. *A Review of Research Topics, Venues, and Top Cited Papers*, 2019, ArXiv abs/1908.04332.

22. Romanov A.S., Shelupanov A.A., Bondarchuk S.S. [Generalized authorship identification technique]. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, vol. 1, no. 21, pp. 108–112 (in Russ.).

### Куртукова Анна Владимировна

Студентка каф. безопасности информационных систем (БИС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050  
Тел.: +7 (905) 991 6713  
Эл. почта: [av.kurtukova@gmail.com](mailto:av.kurtukova@gmail.com)

### Сваровская Елизавета Евгеньевна

Студентка каф. БИС ТУСУР  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050  
Тел.: +7-923-428 88 49  
Эл. почта: [swarovski991@gmail.com](mailto:swarovski991@gmail.com)

### Романов Александр Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. БИС ТУСУР  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050  
Тел.: + 7 (382-2) 41-34-26  
Эл. почта: [alexh.romanov@gmail.com](mailto:alexh.romanov@gmail.com)

### Kurtukova A.V., Svarovskaya E.E., Romanov A.S. Assessing the impact of obfuscation on the process of identifying the author of a program code

Various ways of obfuscating the source code can reduce the effectiveness of the applied models of identifying the author of the program code to random guessing. This article is devoted to assessing the influence of the fact of obfuscation of the source code on the process of identifying the author of a program using a hybrid neural network model. As part of the study, experiments were carried out with both interpreted and compiled programming languages. The results obtained indicate the stability of the previously proposed model of a hybrid neural network to obfuscation and the possibility of its application to solve the problem.

**Keywords:** author, source code, obfuscation, neural network, machine learning.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-50-54

### References

1. Popa M. Techniques of Program Code Obfuscation for Secure Software. *Journal of Mobile, Embedded and Distributed Systems*, no. 3, 2011, pp. 205–219.

**Anna V. Kurtukova**

Student, Department of Information System Security  
of Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-905-991-67-13  
Email: av.kurtukova@gmail.com

**Aleksandr S. Romanov**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,  
Department of Information System Security, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: + 7 (382-2) 41-34-26  
Email: alexx.romanov@gmail.com

**Elizaveta E. Svarovskaya**

Student, Department of Information System Security TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-923-428-88-49  
Email: svarovski991@gmail.com

УДК 004.021:519.713

А.Н. Горитов, К.В. Гончаров

## Планирование траектории движения манипуляционного робота в неизвестной среде на основе алгоритма муравьиных колоний

Манипуляционные роботы находят широкое применение в различных сферах деятельности человека. Выполнение многих практически важных задач связано с работой во внешней среде, содержащей объекты, ограничивающие рабочее пространство манипуляционного робота. Задача усложняется тем, что количество, положение и габариты объектов внешней среды не известны. Эти данные могут быть получены только в процессе построения плана траектории. Предлагается алгоритм планирования траектории движения многозвенного манипулятора на основе алгоритма муравьиных колоний – метаэвристического алгоритма для решения задач на графах. Анализируются результаты работы алгоритма при различных наборах параметров. На основе анализа даются рекомендации по подбору параметров для эффективного решения задачи планирования.

**Ключевые слова:** манипуляционный робот, траектория, планирование траектории, неизвестная среда, препятствия, алгоритм муравьиных колоний.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-55-64

Манипуляционные роботы (МР) находят широкое применение в различных сферах деятельности человека. С точки зрения управления МР является сложным динамическим объектом, который характеризуется многомерностью, взаимосвязанными переменными и нелинейностью.

Перемещение исполнительного звена МР выполняется путем изменения взаимного положения звеньев МР (рис. 1). Для этого формируются законы управления звеньями МР. Основой для формирования законов управления звеньями манипулятора выступает план траектории перемещения исполнительного звена манипулятора.

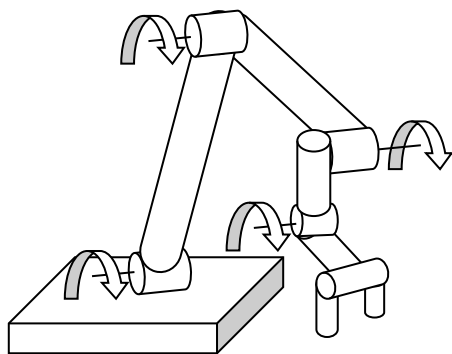


Рис. 1. Манипуляционный робот

Решение задачи планирования траектории во внешней среде с известными препятствиями и аналитически описанными препятствиями рассматривалось в работах [1–4]. Часть методов основана на графовом подходе и алгоритмах эвристического поиска в известной среде [5–7]. Для препятствий, представленных многогранниками, рассматривалось применение методов линейного программирования [8, 9].

Если в промышленности план перемещения исполнительного звена очень часто задают в режиме обучения, то в ряде отраслей, в частности, в строи-

тельстве, использование режима обучения затруднено или просто невозможно [10].

Многие практически важные задачи связаны с необходимостью обеспечить функционирование МР во внешней среде с препятствиями. В этом случае необходимо обеспечить перемещение звеньев МР из начального состояния в целевое так, чтобы не допустить соударения с объектами внешней среды.

Планирование траектории во внешней среде с препятствиями усложняется отсутствием полной информации о положении и габаритах преград [11–17].

Информацию о положении препятствий манипуляционный робот получает с помощью датчиков.

Предложены алгоритмы планирования траектории манипуляторов на основе поступающей локальной сенсорной информации [18, 19]. К недостаткам этих алгоритмов относится отсутствие гарантированной сходимости к цели.

Таким образом, задача построения плана траектории перемещения исполнительного звена манипуляционного робота во внешней среде с неизвестным расположением препятствий в настоящее время является важной для практики задачей.

Цель работы – исследование возможности применения алгоритма муравьиных колоний для построения плана траектории перемещения исполнительного звена МР во внешней среде с неизвестным расположением препятствий.

### Постановка задачи

Пусть в трехмерном пространстве находится  $N$ -звенный МР. Звенья МР образуют кинематические пары пятого класса [20].

Будем предполагать, что основание МР статично. Пространственное положение звеньев МР определяется значениями вектора обобщенных координат [21]

$$\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_N). \quad (1)$$

Начальное положение исполнительного звена МР обозначим как  $M_0(x_0, y_0, z_0)$ , а целевое поло-



жение как  $M_c(x_c, y_c, z_c)$ . Соответственно, начальное положение исполнительного звена МР будет определяться вектором обобщенных координат  $\mathbf{q}^{(0)} = (q_1^{(0)}, q_2^{(0)}, \dots, q_N^{(0)})$ , а целевое –  $\mathbf{q}^{(c)} = (q_1^{(c)}, q_2^{(c)}, \dots, q_N^{(c)})$ .

В процессе перемещения звеньев МР значения обобщенных координат должны удовлетворять неравенству

$$q_{i \min} \leq q_i \leq q_{i \max}, \quad (2)$$

где  $q_{i \min}$  – минимальное значение  $i$ -й обобщенной координаты;  $q_{i \max}$  – максимальное значение  $i$ -й обобщенной координаты;  $i = 1, 2, \dots, N$ .

В рабочем пространстве МР находится произвольное множество объектов  $\mathbf{P}$ , называемых далее препятствиями. Каждое препятствие характеризуется своими габаритами и положением в рабочем пространстве МР. Положение препятствий во внешней среде МР и их габариты предварительно не известны.

В процессе построения плана траектории выполняется контроль на отсутствие столкновений с объектами внешней среды. Положение, при котором звенья МР входят в контакт с препятствием (объектом внешней среды), называется запрещенным. Информация о возможности перемещения МР из  $k$ -го положения в  $(k+1)$ -е принимается на основе данных, поступающих от различных источников, об отсутствии соударения звеньев МР с препятствиями.

Задача построения плана траектории состоит в том, чтобы получить последовательность промежуточных положений МР, которые позволяют перевести исполнительное звено МР из начального положения  $M_0$  в целевое положение  $M_c$  и в процессе перемещения не допустить контакт звеньев МР с препятствиями, находящимися во внешней среде [22].

#### Решение задачи

Методы планирования траектории можно разделить на комбинаторные и эвристические.

Комбинаторные методы предполагают перебор всех возможных перемещений манипуляционного робота и выбор среди найденных решений варианта, удовлетворяющего заданным критериям. Эвристические методы позволяют выбрать следующее состояние манипуляционного робота из возможных на основе набора правил, заданных в этом методе. В большинстве случаев это позволяет сократить вычислительную сложность решения задачи планирования траектории.

В работе предлагается использовать для построения плана траектории алгоритм муравьиных колоний [23, 24].

В общем виде алгоритм муравьиных колоний имеет следующий вид:

Алгоритм муравьиных колоний.

1. Инициализация начальных параметров.
2. Пока (не превышено максимальное количество итераций) выполнить.
3. Создаем муравьев.
4. Ищем решения.
5. Обновляем феромон.
6. Дополнительные действия.

Итерация – это одно повторение совокупности операций создания муравьев, поиска решений, обновления уровня феромона и выполнения дополнительных действий. Феромон – специальный секрет, откладываемый как след при перемещении муравья.

Перемещение муравьев выполняется между вершинами из заранее заданного множества вершин. За вероятность перехода  $k$ -го муравья из вершины  $i$  в вершину  $j$  на  $t$ -й итерации отвечает вероятностно-пропорциональное правило [24]

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in \mathbf{J}_{ik}} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta}, & \text{если } j \notin \mathbf{J}_{ik}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & \text{если } j \in \mathbf{J}_{ik}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – два регулирующих параметра, а  $\mathbf{J}_{ik}$  – множество посещенных муравьем  $k$  вершин, смежных с вершиной  $i$ . Параметр  $\alpha$  задаёт вес следа феромона, а  $\beta$  – привлекательности вершины при выборе маршрута. При  $\alpha = 0$  приоритет будет отдаваться вершинам, расположенным ближе к текущей, однако маршрут будет носить случайный характер. Если  $\beta = 0$ , тогда работает лишь феромонное усиление, что влечет за собой быстрое вырождение маршрутов к одному субоптимальному решению.

Стоит заметить, что хотя вероятностно-пропорциональное правило не изменяется на протяжении итерации, значения вероятностей для двух муравьев в одной и той же вершине могут отличаться, так как  $P_{ij,k}(t)$  – функция от  $\mathbf{J}_{i,k}$  – множества посещенных муравьем  $k$  вершин.

После завершения маршрута всеми муравьями каждый муравей  $k$  откладывает на ребре  $(i, j)$  следующее количество феромона [25]:

$$\Delta\tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{1}{L_k(t)}, & \text{если } (i, j) \in \mathbf{T}_k(t), \\ 0, & \text{если } (i, j) \notin \mathbf{T}_k(t), \end{cases} \quad (4)$$

где  $\mathbf{T}_k(t)$  – маршрут, пройденный муравьем  $k$  на итерации  $t$ ;  $L_k(t)$  – длина этого маршрута.

В случае двумерной задачи вычислительная сложность алгоритма оценивается как  $O(t_{\max} \cdot m \cdot n^2)$ , где  $t_{\max}$  – максимальное количество итераций,  $m$  – количество муравьев в колонии,  $n$  – количество узлов сетки [26].

#### Адаптация алгоритма муравьиных колоний для задачи построения плана траектории перемещения манипуляционного робота

Для применения алгоритма муравьиных колоний к задаче построения плана траектории перемещения манипуляционного робота необходимо свести задачу к задаче о поиске кратчайшего пути между парой вершин в графе.

Графом, на котором будет производиться поиск кратчайшего пути, является граф-решётка [27]  $G(\mathbf{V}, \mathbf{E})$ , где  $\mathbf{V} \subset \mathbf{Z}^3$  – множество вершин, соответствующих промежуточному положению исполни-

тельного звена манипуляционного робота,  $E = \{((i, j, k), (i', j', k')) \in V^2 : |i - i'| + |j - j'| + |k - k'| = 1\}$  – множество рёбер, задающих переходы между промежуточными положениями.

Соответствие между вершинами графа и промежуточными положениями исполнительного звена определяется следующим образом:

$$g : V \rightarrow M; g(v) = (x_0 + v_x d, y_0 + v_y d, z_0 + v_z d), \quad (5)$$

где  $M$  – множество рассматриваемых положений исполнительного звена,  $v(v_x, v_y, v_z)$  – отображаемая вершина графа. Нетрудно видеть, что вершина  $v_0$ , соответствующая начальному положению исполнительного звена  $M_0$ , равна  $(0, 0, 0)$ . Выбранное целевое положение  $M_c$  должно принадлежать  $M$ .

Обратное соответствие  $g^{-1} : M \rightarrow V$  определяется следующим образом:

$$g^{-1}(M_i) = \left( \frac{x_i - x_0}{d}, \frac{y_i - y_0}{d}, \frac{z_i - z_0}{d} \right), \quad (6)$$

где  $d$  – расстояние между рассматриваемыми промежуточными положениями;  $d > 0$ .

Весовая функция  $f : E \rightarrow R_+$ , ставящая в соответствие каждому ребру его вес, определяется следующим образом:

$$f((v, w)) = \begin{cases} d, & g(v) \in M_J \text{ и } g(w) \in M_J, \\ +\infty & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (7)$$

где  $(v, w)$  – ребро графа  $G$ ,  $M_J$  – множество разрешённых промежуточных положений или достижимых положений, при которых не происходит столкновения звеньев МР с препятствиями и другими звеньями.

При решении задачи о кратчайшем пути между парой вершин каждый муравей размещается в начальной вершине. Вершина  $v_0$  является начальной вершиной. На каждом шаге поиска решения муравей выбирает из смежных вершин вершину для перехода согласно вероятностному правилу, определяемому (3), и добавляет выбранную вершину в свой путь. По достижении вершины, соответствующей целевому положению исполнительного звена (конечной вершины), построение решения заканчивается. Конечной вершиной является вершина  $v_c = g^{-1}(M_c)$ . Использование множества посещённых вершин оправдано, так как кратчайший путь является простым.

На каждом ребре имеется некоторое количество феромона. При построении графа количество феромона на каждом ребре устанавливается равным небольшому положительному числу. После построения решения каждым муравьём на одной итерации алгоритма происходит обновление уровня феромона: происходит уменьшение уровня феромона на каждом ребре, затем происходит увеличение феромона на рёбрах, использованных для построения

решения муравьём, обратно пропорционально длине пути муравья.

Блок-схема адаптированного алгоритма муравьиных колоний приведена на рис. 2.

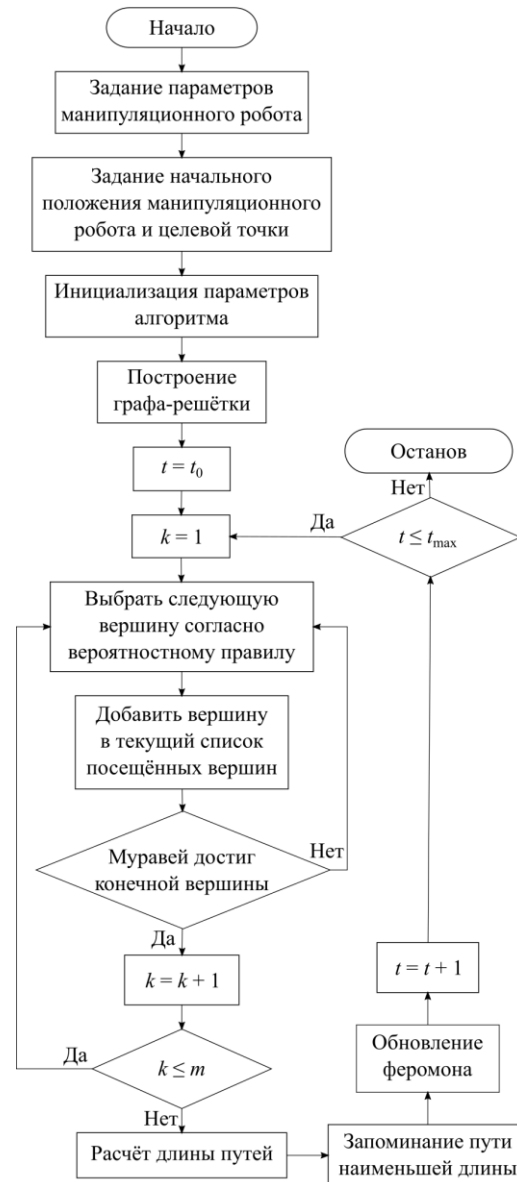


Рис. 2. Блок-схема алгоритма муравьиных колоний применительно к задаче построения плана траектории

Адаптированный алгоритм муравьиных колоний позволяет получить последовательность промежуточных положений МР, последовательное прохождение которых обеспечивает перемещение исполнительного звена МР из начального положения  $M_0$  в целевое положение  $M_c$ . Каждое промежуточное положение МР характеризуется набором дискретных значений обобщенных переменных  $q_i^{(j)}$ , где  $i = 1, 2, \dots, N$  и  $j = 0, 1, \dots, p$ . Здесь  $N$  – число звеньев МР,  $p$  – число промежуточных состояний МР. Соответственно,  $q_i^{(0)}$  – значения обобщенных переменных в начальном положении МР,  $q_i^{(p)} = q_i^{(c)}$  –

значения обобщенных переменных в целевом положении МР.

Аппроксимация дискретных значений обобщенных переменных  $q_i^{(j)}$  позволяет получить непрерывные функции  $q_i(t)$  изменения обобщенных переменных во времени. Аппроксимирующие полиномы должны удовлетворять условиям

$$q_i(t_j) = q_i^{(j)}, j = 0, 1, \dots, p,$$

где  $t_0, t_1, \dots, t_p$  – неубывающая последовательность точек разбиения интервала  $[0, T]$ , где  $t_0 = 0, t_p = T$ . Здесь  $T$  – время, за которое МР должен переместиться из начального положения  $M_0$  в целевое положение  $M_c$ . Кроме того, аппроксимирующие функции должны удовлетворять условиям

$$\begin{aligned} |\dot{q}_i(t)| &\leq \dot{q}_{\max}, \\ |\ddot{q}_i(t)| &\leq \ddot{q}_{\max}. \end{aligned}$$

Если МР до выполнения перемещения находится в статичном состоянии и после окончания движения также переходит в статичное состояние, что характерно для многих операций, выполняемых МР, то на производные функции  $q_i(t)$  накладываются граничные условия

$$\begin{aligned} \dot{q}_i(0) &\leq 0, \quad \dot{q}_i(c) \leq 0, \\ \ddot{q}_i(0) &\leq 0, \quad \ddot{q}_i(c) \leq 0. \end{aligned}$$

В этом случае для получения непрерывных функций  $q_i(t)$  изменения обобщенных переменных во времени можно использовать интерполяционные сплайны третьего порядка [28]

$$q_i(t) = a_{ik} + b_{ik}(t - t_k) + c_{ik}(t - t_k)^2 + d_{ik}(t - t_k)^3$$

при  $t \in [t_{k-1}, t_k], k = 1, 2, \dots, p$ .

Полученные функции изменения обобщенных переменных позволяют построить непрерывное и гладкое перемещение МР из начального положения  $M_0$  в целевое положение  $M_c$ .

#### Результаты численных экспериментов

Входными параметрами алгоритма муравьиных колоний являются: регулятор влияния феромона  $\alpha$ , регулятор влияния эвристической информации  $\beta$ , регулятор влияния отклонённости  $\gamma$ , скорость испарения феромона  $\rho$ , количество муравьев  $m$  и максимальное количество итераций  $t_{\max}$ .

Работа алгоритма во многом зависит от заданных значений этих параметров. Рассмотрим, как влияет изменение каждого параметра на результат работы алгоритма. При изменении параметров в наборах испытаний значения неизменяющихся параметров равны значениям параметров из базового набора. Значения параметров из базового набора следующие:  $\alpha_0 = 1, \beta_0 = 1, \gamma_0 = 0,25, \rho_0 = 0,25, m_0 = 64, t_{\max 0} = 100$ .

Для численных экспериментов использовалась модель многозвенного манипуляционного робота. Во внешней среде МР находились препятствия, но пространственное положение и их габариты МР бы-

ли неизвестны. В процессе перемещения звеньев МР выполняется контроль на соударение с препятствиями. Положение звеньев манипулятора, при котором возникает соударение, считается запрещенным и при построении плана траектории перемещения исполнительного звена МР не используется.

#### Регулятор влияния феромона

Выбор подходящего значения параметра, регулирующего влияние количества феромона на выбор ребра, имеет большое значение при решении оптимизационной задачи. Слишком низкое значение параметра приводит к замедлению процесса поиска решения; слишком высокое – к сходимости процесса поиска решения к локальному оптимуму.

Были проведены численные эксперименты при базовом значении коэффициента влияния уровня феромона ( $\alpha = 1$ ), при значении, исключающем влияние уровня феромона ( $\alpha = 0$ ), и при значениях, увеличивающих влияние уровня феромона ( $\alpha = 2, \alpha = 3, \alpha = 4$ ). На рис. 3 приведены результаты расчётов при данных значениях регулятора влияния феромона.

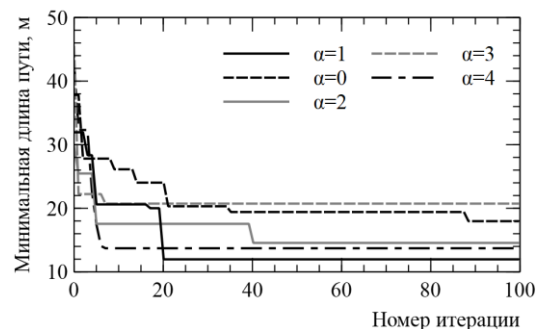


Рис. 3. Графики зависимости минимальных длин пути от номера итерации при различных значениях параметра  $\alpha$

При  $\alpha = 1$  был получен путь с наименьшей длиной из всех проведенных испытаний, при этом время работы алгоритма больше, чем время работы алгоритма при  $\alpha > 1$ , что связано с меньшими затратами на поиск пути при нахождении локального минимума.

На рис. 4 можно видеть, что при  $\alpha > 1$  процесс поиска решения сходится к локальному минимуму.

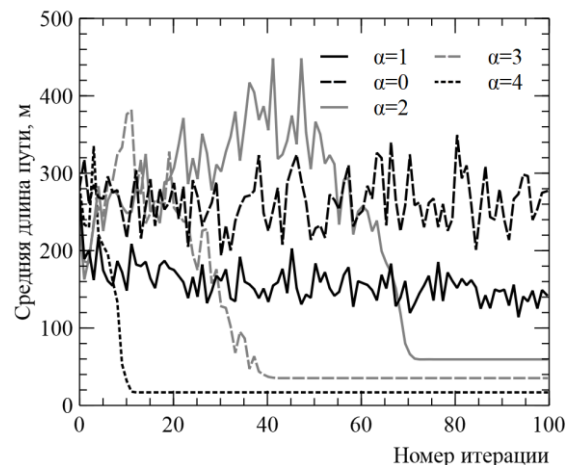


Рис. 4. Графики зависимости средних длин пути от номера итерации при различных значениях параметра  $\alpha$

Среднее значение длины пути становится постоянным на итерации № 77 при значении параметра  $\alpha = 2$ , на итерации № 44 при значении параметра  $\alpha = 3$  и на итерации № 14 при значении параметра  $\alpha = 4$ . Следует отметить, что значение локального минимума не равно значениям минимальной длины пути, найденного на той же итерации, что и локальный минимум, в каждом из экспериментов, где локальный минимум был найден.

Кроме того, при исключении влияния количества феромона на выбор ребра процесс поиска решения приобретает практически случайный характер, так как результаты поиска на предыдущих итерациях алгоритма не учитываются.

**Регулятор влияния эвристической информации**

В качестве эвристической информации  $\eta_{ij}$  о ребре  $(i, j)$  выбрана величина, обратная весу ребра  $(i, j)$ ; таким образом, эвристическая информация о ребре определяется следующим образом:

$$\eta_{ij} = 1 / f((i, j)). \tag{8}$$

Для определения степени влияния параметра на результаты поиска оптимального пути были поставлены численные эксперименты при базовом значении коэффициента влияния эвристической информации ( $\beta = 1$ ) и при значении коэффициента, исключающего влияние эвристической информации на выбор ( $\beta = 0$ ).

Изменение коэффициента влияния веса ребра не оказывает существенного влияния на результаты поиска пути минимальной длины (рис. 5).

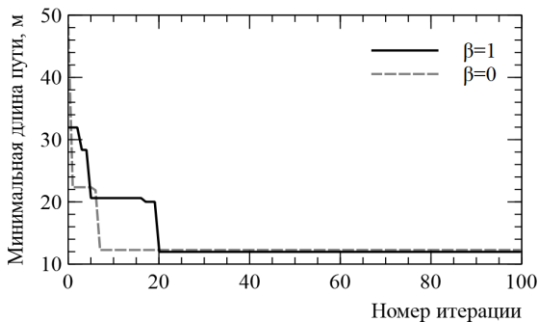


Рис. 5. Графики зависимости минимальных длин пути от номера итерации при различных значениях параметра  $\beta$

Причина заключается в том, что весовая функция отображает все рёбра, соединяющие вершины, соответствующие разрешённым промежуточным положениям, в одно и то же значение. Обозначим это значение  $\eta$ . Тогда формула (3) примет следующий вид:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot \eta^\beta}{\eta^\beta \sum_{l \notin J_{ik}} [\tau_{il}(t)]^\alpha}, & \text{если } j \notin J_{ik}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & \text{если } j \in J_{ik}. \end{cases}$$

Так как  $\eta > 0$ , то числитель и знаменатель дроби можно разделить на  $\eta^\beta$ . Получим следующее представление формулы:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha}{\sum_{l \notin J_{ik}} [\tau_{il}(t)]^\alpha}, & \text{если } j \notin J_{ik}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & \text{если } j \in J_{ik}. \end{cases}$$

Легко видеть, что вероятность выбора вершины больше не зависит от параметра, регулирующего влияние эвристической информации.

**Регулятор влияния отклонённости**

В работе, посвящённой применению алгоритма муравьиных колоний для решения задачи о поиске кратчайшего пути в транспортной сети [29], была предложена модификация алгоритма, использующая информацию о положении вершин графа в пространстве. Применим данную модификацию к рассматриваемой задаче.

Пусть  $e(e_x, e_y, e_z)$  – конечная вершина. Пусть  $\mathbf{d}_{ij} = (j_x - i_x, j_y - i_y, j_z - i_z)$  – вектор направления движения от вершины  $i$  к вершине  $j$ . Пусть муравей, находясь в вершине  $i$ , рассматривает смежную с ней вершину  $j$ , вычисляя её привлекательность. Угол между векторами  $\mathbf{d}_{ij}$  и  $\mathbf{d}_{ie}$  (назовём его  $\theta_{ij}$ ) показывает, насколько направление движения от  $i$  к  $j$  отклоняется от направления движения от  $i$  к  $e$  напрямую; чем меньше данный угол, тем более привлекательной должна быть вершина  $j$  для муравья.

С использованием данной модификации формула (3) принимает следующий вид:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta \cdot [u_{ij}]^\gamma}{\sum_{l \notin J_{ik}} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta \cdot [u_{il}]^\gamma}, & \text{если } j \notin J_{ik}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & \text{если } j \in J_{ik}, \end{cases}$$

где  $u_{ij} = 1 / (1 + \theta_{ij})$  – величина, обратная отклонённости направления пути от  $i$  к  $j$ ,  $\gamma$  – параметр, регулирующий влияние отклонённости. Угол  $\theta_{ij}$  можно вычислить следующим образом:

$$\theta_{ij} = \arccos \frac{(\mathbf{d}_{ij}, \mathbf{d}_{ie})}{|\mathbf{d}_{ij}| \cdot |\mathbf{d}_{ie}|}. \tag{9}$$

С целью определения степени влияния регулятора на результаты поиска кратчайшего пути были поставлены численные эксперименты при значениях параметра  $\gamma \in \{0,25; 0,5; 1; 2\}$ . Результаты эксперимента при значении регулятора, исключающего влияние отклонённости на выбор ребра, получить не удалось по причине чрезмерных затрат времени на получение решения.

Из результатов численных экспериментов (рис. 6) видно, что наибольшая эффективность алгоритма достигается при значении параметра  $\gamma = 1$ .

Дальнейшее увеличение параметра не приводит к существенному выигрышу.

**Скорость испарения феромона**

Испарение феромона, т.е. уменьшение во времени количества отложенного на предыдущих ите-

рациях феромона, позволяет обеспечить исследование всего пространства решений. Обозначим коэффициент испарения феромона через  $\rho \in [0,1]$ . Тогда правило обновления феромона примет вид [23]

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \quad (10)$$

где  $\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij,k}(t)$ ,  $m$  – количество муравьёв в колонии.

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных при различных значениях коэффициента скорости испарения феромона, приведены на рис. 7.

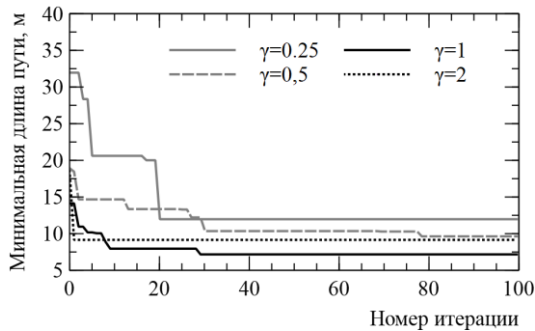


Рис. 6. Графики зависимости минимальной длины путей от номера итерации при различных значениях параметра  $\gamma$

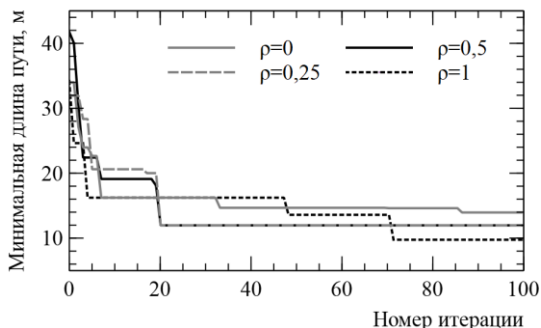


Рис. 7. Графики зависимости минимальных длин пути от номера итерации при различных значениях параметра  $\rho$

Расчеты проводились при базовом значении коэффициента скорости испарения феромона ( $\rho = 0,25$ ) при значении коэффициента, исключающем испарение феромона ( $\rho = 0$ ), при повышенном значении коэффициента скорости испарения ( $\rho = 0,5$ ) и при значении коэффициента, при котором происходит полное испарение феромона после завершения итерации ( $\rho = 1$ ).

Результаты расчётов демонстрируют отсутствие значительного влияния параметра, регулирующего скорость испарения феромона, на минимальную длину найденного пути.

#### Количество муравьёв

При увеличении количества муравьёв увеличивается число анализируемых путей ( $m \times t_{\max}$ ) в процессе решения задачи, что приводит к более полному исследованию пространства поиска решения и, как следствие, к нахождению пути меньшей длины, однако при этом увеличивается время работы алгоритма.

При исследовании зависимости минимальной длины найденного пути от количества муравьёв были выполнены расчёты со значениями параметра количества муравьёв  $m \in \{4, 8, 16, 64\}$  при фиксированном количестве итераций ( $t_{\max} = 100$ ).

В результате расчётов установлено, что увеличение численности муравьиной колонии приводит к нахождению пути меньшей длины за меньшее количество итераций (рис. 8)

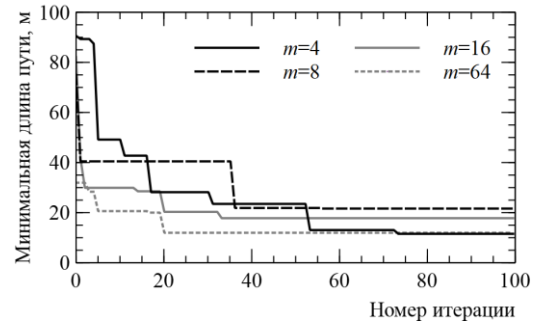


Рис. 8. Графики зависимости минимальных длин пути от номера итерации при различных значениях параметра  $m$

Расчёты, проводимые при численности муравьиной колонии  $m > 64$ , требуют большого количества времени. При увеличении параметра рекомендуется уменьшать количество итераций алгоритма.

#### Количество итераций

Назовём попыткой процесс построения решения одним муравьём на одной итерации. Количество попыток, таким образом, равно произведению количества муравьёв на количество итераций. При одном и том же количестве попыток время работы алгоритма будет приблизительно одинаковым при разном количестве итераций.

Были проведены испытания при различных значениях количества итераций и фиксированном количестве попыток. Рассматриваются результаты испытаний при значении параметра  $t_{\max} \in \{8, 16, 25, 50, 100, 200\}$  и при количестве попыток, равном 6 400.

Результаты расчётов указывают на предпочтительность уменьшения количества итераций в пользу увеличения количества муравьёв при фиксированном количестве попыток (рис. 9).

#### Алгоритм «элитных муравьёв»

С увеличением размера задачи производительность алгоритма муравьиных колоний резко падает. С целью улучшить время нахождения оптимального решения были предложены различные модификации алгоритма [25]. Первой такой модификацией стал алгоритм «элитных муравьёв», отличающийся от немодифицированного алгоритма правилом обновления феромона [30].

Идея алгоритма «элитных муравьёв» заключается в усилении следа феромона на пути с наименьшей длиной из всех построенных на  $t$ -й итерации. Обозначим этот путь  $T_{bs}(t)$ . Усиление происходит за счёт добавления на каждое ребро пути  $T_{bs}(t)$  фе-

ромона в количестве  $e / L_{bs}(t)$ , где  $e$  – регулируемый параметр,  $L_{bs}(t)$  – длина пути  $T_{bs}(t)$ . Формула обновления феромона (10) принимает следующий вид:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) + e\Delta\tau_{ij}^{bs}(t), \quad (11)$$

где

$$\Delta\tau_{ij}^{bs}(t) = \begin{cases} 1/L_{bs}(t), & (i, j) \in T_{bs}(t), \\ 0, & (i, j) \notin T_{bs}(t). \end{cases} \quad (12)$$

Нетрудно видеть, что при  $e = 0$  алгоритм «элитных муравьёв» вырождается в немодифицированный алгоритм муравьиных колоний.

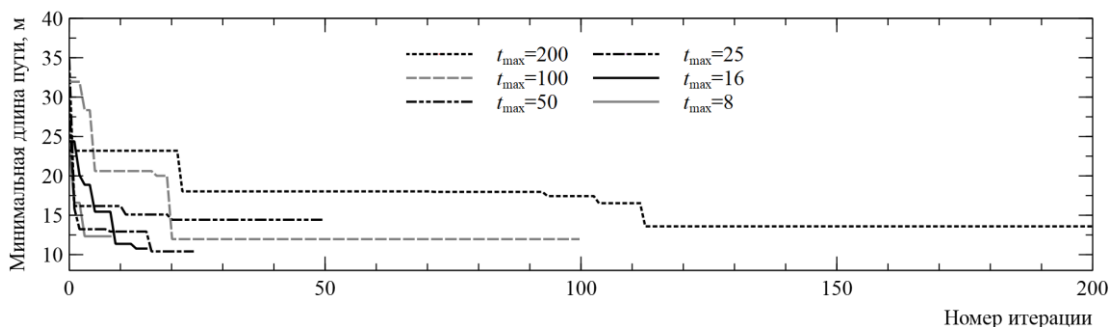


Рис. 9. Графики зависимости минимальных длин путей от номера итераций при различных значениях параметра  $t_{max}$  и при фиксированном значении  $m \times t_{max}$

При сравнении эффективности двух алгоритмов проводились расчёты с использованием немодифицированного алгоритма ( $e = 0$ ) и модифицированного алгоритма со значениями параметра  $e = m$  ( $e = 64$ ),  $e < m$  ( $e = 16$ ) и  $e > m$  ( $e = 256$ ).

Результаты расчётов показывают превосходство алгоритма «элитных муравьёв» над оригинальным алгоритмом муравьиных колоний при значении параметра  $e \leq m$  (рис. 10).

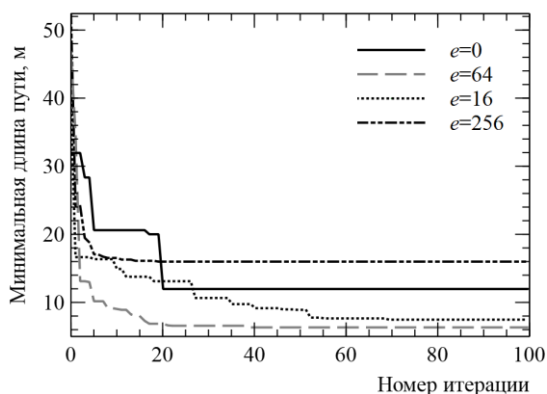


Рис. 10. Графики зависимости минимальных длин пути от номера итерации при различных значениях параметра  $e$

При выборе значения параметра  $e > m$  происходит схождение к локальному минимуму по причине чрезмерного усиления следа феромона на лучшем пути на момент обновления феромона.

#### Рекомендации по отбору параметров

По результатам численных экспериментов можно сделать следующие рекомендации.

При значении параметра  $\alpha > 1$  найденное решение является локальным минимумом, а при значении  $\alpha = 0$  поиск решения занимает больше времени, при этом результат поиска не является лучшим из всех результатов экспериментов. Исходя из результатов экспериментов, рекомендуемым значением для регулятора влияния уровня феромона является значение  $\alpha = 1$ .

С использованием весовой функции (7) значение параметра  $\beta$  не оказывает существенного влияния на результаты поиска пути минимальной длины. В связи с этим невозможно рекомендовать определённое значение данного параметра.

При значении параметра  $\gamma$ , равном нулю, получение решения становится невозможным по причине непопустимо больших затрат времени. При чрезмерном увеличении значения параметра падает эффективность алгоритма вплоть до невозможности получения решения по аналогичной причине. Принимая во внимание результаты численных экспериментов, можно рекомендовать значения  $\gamma \in [0, 25; 1]$ .

По причине того, что при значениях прочих параметров нет сходимости алгоритма к некоторому локальному минимуму, изменение параметра скорости испарения не оказывает существенного влияния на результаты. На основании полученных результатов рекомендуется установить значение параметра  $\rho = 1$ .

Рекомендуется устанавливать значение количества муравьёв  $m$  не менее 16. Дальнейшее увеличение параметра приводит к улучшению найденного решения за счёт увеличения затрат времени пропорционально увеличению параметра.

При выборе между увеличением количества муравьёв и увеличением количества итераций при фиксированном количестве попыток рекомендуется отдавать предпочтение большему количеству муравьёв при меньшем количестве итераций.

Наконец, рекомендуется использовать алгоритм «элитных муравьёв» вместо обычного алгоритма муравьиных колоний. Результаты экспериментов показывают как существенное улучшение найденного решения, так и существенное уменьшение используемого для поиска решения времени. Не рекомендуется устанавливать значение параметра  $e$ , превышающее значение параметра количества муравьёв  $m$ , так как это приводит к нахождению локального минимума.

### Заключение

Для решения задачи планирования перемещения многозвенного манипулятора был предложен алгоритм, основанный на алгоритме муравьиных колоний. Был реализован программный продукт, позволяющий с помощью предложенного алгоритма совершить построение траектории перемещения манипуляционного робота и проанализировать результаты работы алгоритма. Полученные результаты позволяют определить диапазоны изменения параметров алгоритма, обеспечивающие эффективное решение поставленной задачи.

### Литература

- Canny J. The complexity of robot motion planning. – Cambridge: Massachusetts: MIT Press, 1988. – 195 p.
- LaValle S.M. Planning Algorithms. – Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2006. – 1023 p.
- Donald B.R. On motion planning with six degrees of freedom: Solving the intersection problems in configuration space // Proceedings of the IEEE International conference on robotics and automation. – 1985. – Vol. 2. – P. 536–541.
- Shin K. Automatic generation of trajectory planners for industrial robots / K. Shin, N. McKay // Proc. IEEE Int. Conf. Rob. and Autom. – 1986. – Vol. 3. – P. 260–266.
- Пронин А.С. Построение программных траекторий движения манипулятора в среде с препятствиями // Автономные роботы и распознавание образов. – Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1986. – С. 11–20.
- Gouzenes L. Strategies for solving collision-free trajectory problems for mobile and manipulator robots // Int. J. Robot. Res. – 1984. – Vol. 3, No. 4. – P. 51–65.
- Hopcroft J. Reducing multiple object motion planning to graph searching / J. Hopcroft, G. Wilfong // SIAM J. Comput. – 1986. – Vol. 15, No. 3. – P. 768–785.
- Генерозов В.Л. Алгоритм планирования траектории манипулятора при наличии препятствий // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1984. – № 1. – С. 137–147.
- Гречановский Е.И. Метод планирования движений манипулятора при наличии препятствий / Е.И. Гречановский, И.Ш. Пинскер // Модели. Алгоритмы. Принятие решения. – М.: Наука, 1979. – С. 100–142.
- Булгаков А.Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление / А.Г. Булгаков, В.А. Воробьев. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. – 488 с.
- Ильин В.А. Вопросы теории управления роботами в условиях неполной информации о внешней среде / В.А. Ильин, А.М. Корилов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1982. – № 4. – С. 202.
- Петров А.А. Формирование движений манипуляционного робота при обходе препятствий в условиях ограниченной информации о среде / А.А. Петров, И.М. Сирота // Автоматика и телемеханика. – 1983. – № 4. – С. 29–40.
- Ильин В.А. Интеллектуальные роботы. Теория и алгоритмы. – Красноярск: САА, 1995. – 334 с.
- Горитов А.Н. Построение плана траектории промышленного робота в произвольных рабочих средах // Автоматизация и современные технологии. – 2001. – № 7. – С. 18–23.
- Лопатин П.К. Компьютерная имитация управления семизвенным манипуляционным роботом в среде с неизвестными препятствиями // Вестник Сиб. гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2005. – № 3. – С. 69–74.
- Горитов А.Н. Моделирование манипуляционных робототехнических систем в условиях неполной информации о внешней среде. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы им. Е.В. Зуева СО РАН, 2005. – 275 с.
- Principles of robot motion: theory, algorithms and implementations / H. Choset, K.M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L.E. Kavraki, S. Thrun. – Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2005. – 603 p.
- Аксенов Г.С. Построение программных движений манипулятора при помощи ЭВМ / Г.С. Аксенов, Д.К. Воронцов, В.Н. Фомин // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1978. – № 4. – С. 50–55.
- Лизунов А.Б. Управление движением манипулятора с датчиком ближней локации вдоль контура предмета / А.Б. Лизунов, А.М. Формальский, А.Ю. Шнейдер // Автоматика и телемеханика. – 1987. – № 5. – С. 48–57.
- Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1979. – 576 с.
- Зенкевич С.Л. Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
- Корендяев А.И. Теоретические основы робототехники: в 2 кн. – Кн. 1 / А.И. Корендяев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. – М.: Наука, 2006. – 384 с.
- Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithms // PhD thesis. – Italie: Politecnico di Milano, 1992. – 140 p.
- Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы: теория и практика // Программирование. – 2005. – Т. 31, № 4. – С. 3–18.
- Dorigo M. Ant Colony Optimization / M. Dorigo, T. Stützle. – Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2004. – 305 p.
- Макконелл Дж. Основы современных алгоритмов. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
- Mehlhorn K. Algorithms and Data Structures: The Basic Toolbox / K. Mehlhorn, P. Sanders. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 300 p.
- Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.
- Zhang S. A novel ant colony optimization algorithm for the shortest-path problem in traffic networks / S. Zhang, X. Liu, M. Wang // Filomat. – 2018. – Vol. 32, No. 5. – P. 1619–1628.
- Курейчик В.М. О некоторых модификациях муравьиного алгоритма / В.М. Курейчик, А.А. Кажаров // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 4 (81). – С. 7–12.

### Горитов Александр Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID 0000-0001-5710-5186  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36  
Эл. почта: ang@asu.tusur.ru

### Гончаров Кирилл Викторович

Студент каф. АСУ ТУСУР  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-112-41-25  
Эл. почта: roadto3kmmr@gmail.com

Goritov A.N., Goncharov K.V.

### Motion trajectory planning for a multi-link manipulator in an unknown environment based on ant colony optimization

Robotic manipulators are widely used in various fields of human activity. Accomplishment of many practically important tasks involves operation in an external environment containing objects that limit the workspace of a manipulator. These tasks are further complicated by the fact that number, position and dimensions of objects in an external environment are unknown. This data can only be acquired while making the trajectory plan.

In this paper, a motion planning algorithm for a multi-link manipulator based on ant colony optimization, that is represented in a metaheuristic framework applied to a wide class of graph problems, is proposed. The results obtained with the proposed algorithm with various sets of parameters are analyzed, and the recommendations on parameter selection for efficient solution of a planning problem are given based on analysis.

**Keywords:** robotic manipulator, trajectory planning, trajectory, unknown environment, obstacles, ant colony optimization.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-55-64

#### References

1. Canny J. *The complexity of robot motion planning*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1988. 195 p.
2. LaValle S.M. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2006. 1023 p.
3. Donald B.R. On motion planning with six degrees of freedom: Solving the intersection problems in configuration space. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1985, vol. 2, pp. 536–541.
4. Shin K., McKay N. Automatic generation of trajectory planners for industrial robots. *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. and Autom.*, 1986, vol. 3, pp. 260–266.
5. Pronin A.S. *Postroeniye programmnykh trayektorij dvizheniya manipulyatora v srede s prepyatstviyami* [Construction of programmed motion trajectories for a manipulator in a scene containing obstacles] *Autonomous robots and pattern recognition*, Kyiv, Cybernetics Institute, The Academy of Sciences of the UkrSSR, 1986, pp. 11–20 (in Russ.)
6. Gouzenes L. Strategies for solving collision-free trajectory problems for mobile and manipulator robots. *Int. J. Robot. Res.*, 1984, vol. 3, № 4, pp. 51–65.
7. Hoperoft J., Wilfong G. Reducing multiple object motion planning to graph searching. *SIAM J. Comput.*, 1986, vol. 15, no. 3, pp. 768–785.
8. Generozov V.L. *Algoritm planirovaniya trayektorii manipulyatora pri nalichii prepyatstvij* [An algorithm for planning a trajectory of a manipulator in the presence of obstacles]. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Technical Cybernetics*, 1984, no. 1, pp. 137–147 (in Russ.)
9. Grechanovskiy Ye.I., Pinsker I.Sh. *Metody planirovaniya dvizhenij manipulyatora pri nalichii prepyatstvij* [Methods for planning motions of a manipulator in the presence of obstacles]. *Models. Algorithms. Decision making*, Moscow, Science, 1979, pp. 100–142 (in Russ.)
10. Bulgakov A.G., Vorobiev V. A. *Promyshlennye roboty. Kinematika, dinamika, kontrol' i upravleniye* [Industrial robots. Kinematics, dynamics, monitoring and control]. Moscow, SOLON-PRESS, 2007. 488 p. (in Russ.)
11. Ilyin V.A., Korikov A.M. *Voprosy teorii upravleniya robotami v usloviyakh nepolnoj informatsii o vneshnej srede* [Questions of the theory of robot control in conditions of incomplete information about the external environment]. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*, 1982, no. 4, 202 p. (in Russ.)
12. Petrov A.A., Sirota I.M. *Formirovaniye dvizhenij manipulyatsionnogo robota pri obkhode prepyatstvij v usloviyakh ogranichennoj informatsii o srede* [Building motions of a robotic manipulator when avoiding obstacles given limited information about the scene]. *Automatics and telemechanics*, 1983, no 4, pp. 29–40 (in Russ.)
13. Ilyin V.A. *Intellektual'nye roboty. Teoriya i algoritmy* [Intelligent robots. Theory and Algorithms]. Krasnoyarsk, CAA, 1995, 334 p. (in Russ.)
14. Goritov A.N. *Postroeniye plana traektorii promyshlennogo robota v proizvol'nykh rabochikh sredakh* [Construction of a trajectory plan for an industrial robot in arbitrary operating environments]. *Automatization and modern technologies*, 2001, no. 7, pp. 18–23 (in Russ.)
15. Lopatin P.K. *Komp'yuternaya imitatsiya upravleniya semizvennym manipulyatsionnym robotom v srede s neizvestnymi prepyatstviyami* [Computer simulation of a seven-link manipulator control in unknown environment]. *Bulletin of the Reshetnev Siberian State Aerospace University*, 2005, no 3. pp. 69–74 (in Russ.)
16. Goritov A.N. *Modelirovaniye manipulyatsionnykh robototekhnicheskikh sistem v usloviyakh nepolnoi informatsii o srede* [Simulation of robotic manipulator systems given limited information about the scene]. Tomsk, V.E. Zuev Institute of Atmosphere Optics SO RAN Publ., 2005. 275 p. (in Russ.)
17. Choset H., Lynch K.M., Hutchinson S., Kantor G., Burgard W., Kavraki L.E., Thrun S. *Principles of robot motion: theory, algorithms and implementations*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2005. 603 p.
18. Aksyonov G.S., Voronetskaya D.K., Fomin V.N. *Postroeniye programmnykh dvizhenij manipulyatora pri pomoschi EVM* [Construction of programmed motions for a manipulator using a computer]. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Technical Cybernetics*, 1978, no. 4, pp. 50–55 (in Russ.)
19. Lizunov A.B., Formal'skiy A.M., Schneider A.Yu. *Upravleniye dvizheniyem manipulyatora s datchikom blizhej lokatsii vdol' kontura predmeta* [Control of motion of a manipulator with proximity sensor along the silhouette of an obstacle]. *Automatics and telemechanics*, 1987, no. 5, pp. 48–57 (in Russ.)
20. Levitskiy N.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow, Science, 1979. 576 p. (in Russ.)
21. Zenkevitch S.L., Yuschenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* [Basics of control of robotic manipulators]. Moscow, Publishing House of Moscow State Technical University. N.E. Bauman, 2004. 480 p. (in Russ.)
22. Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. *Teoreticheskiye osnovy robototekhniki. V 2 knigakh. Kniga 1* [Theoretical foundations of robotics in 2 books. Book 1]. Moscow, Science, 2006, 384 p. (in Russ.)
23. Dorigo M. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. PhD thesis. Italie, Politecnico di Milano, 1992. 140 p.
24. Shtovba S.D. *Murav'yinye algoritmy: teoriya i praktika* [Ant Colony Optimization: theory and practice]. *Programming*, 2005, vol. 31, no 4, pp. 3–18 (in Russ.)
25. Dorigo M., Stützle T. *Ant Colony Optimization*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2004. 305 p.
26. McConnell J. *Osnovy sovremennykh algoritmov* [Analysis of Algorithms: An Active Learning Approach], 2nd ed., Moscow, Technosphere, 2004. 368 p. (in Russ.)



27. Mehlhorn K., Sanders P. *Algorithms and Data Structures: The Basic Toolbox*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008. 300 p.

28. Verzhbitsky V.M. *Osnovy tschislennykh metodov* [Fundamentals of numerical methods]. Moscow, High School, 2002. 840 p. (in Russ.)

29. Zhang S., Liu X., Wang M. A novel ant colony optimization algorithm for the shortest-path problem in traffic networks. *Filomat*, 2018, vol. 32, no. 5, pp. 1619–1628.

30. Kureychik V.M., Kazharov A.A. *O nekotorykh modifikatsiyakh murav'yinogo algoritma* [On several extensions of the Ant System algorithm]. *Bulletin of SFedU. Engineering Sciences*, 2008, no. 4 (81), pp. 7–12 (in Russ.)

**Aleksandr N. Goritov**

Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Department of Automated Control Systems,  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID 0000-0001-5710-5186  
Phone: +7 (382-2) 70-15-36  
Email: ang@asu.tusur.ru

**Kirill V. Goncharov**

Student Department of Automated Control Systems, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-112-41-25  
Email: roadto3kmmr@gmail.com

УДК 004.651.52

И.Г. Боровской, И.К. Харченко

## Модификация иерархических битовых индексов для повышения производительности систем управления базами данных

Описывается модификация bitmap-индекса, именуемая иерархическим битовым индексом (Hierarchical Bitmap Index, HBI), предполагающая группировку ключей индекса и последующее хранение в  $B^+$ -деревьях. Предложено два подхода организации индексной структуры, позволяющих получить двукратный прирост производительности по скорости поиска, а также прирост по количеству операций ввода-вывода.

**Ключевые слова:** иерархический битовый индекс, HBI, алгоритмы и структуры данных,  $B^+$ -дерево, индексирование в СУБД, C#.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-65-72

Битовые индексы (bitmap-индексы) уже давно стали стандартным способом оптимизации запросов в таких СУБД, как Oracle, Cache и др. [1, 2]. Однако их эффективность сильно зависит от запроса, в том числе в них ограничена поддержка таких операций поиска, как поиск по диапазону. Существует модификация данных индексов, основанная на хранении данных в раздельном виде, где битовые карты используются в качестве разделителей.

Есть ряд факторов, определяющих целесообразность использования битовых индексов. Нужно учитывать тип индексируемого атрибута, сколько уникальных значений хранится в атрибуте, а также запросы какого характера будут использоваться для поиска по данному атрибуту [3, 4].

Идея иерархических битовых индексов (Hierarchical Bitmap Indexes, HBI) подробно разъяснена в работах [5–8]. Основная идея в том, что вместо хранения всех битовых строк для каждого ключа индекса все значения разделяются на группы, а битовая строка (далее – битовая маска) генерируется для каждой группы так, чтобы каждое значение соответствовало одной и только одной группе. Ключи каждой группы могут храниться в виде обычных битовых карт, в таком случае прирост производительности получается за счёт уменьшения количества конъюнкций, осуществляемых при поиске ключа. Также они могут храниться в виде двусвязного списка (скорость поиска в худшем случае  $O(n)$ ) в случае малого  $n$ , либо в виде более производительных структур в случае большого  $n$ , таких как  $B^-$ ,  $B^*$  и  $B^{*+}$ -деревья.

Прирост производительности достигается в том случае, когда запрашиваемый диапазон значений хранится в одной или нескольких группах: тогда все значения можно прочитать с диска за  $N$  операций, где  $N$  – количество групп, в которые входит диапазон значений [9].

К примеру, есть множество значений с равномерным распределением от 1 до 256. Их можно разделить на три группы: до 63, от 64 до 127, от 128 до 256. Тогда все элементы будут равномерно распределены по разным деревьям (рис. 1).

Использование  $B^+$ -дерева предпочтительнее  $B^*$ - и  $B^{*+}$ -деревьев ввиду увеличения сложности процедуры балансировки в последних, а также потому, что

большинство известных на рынке СУБД и файловых систем в операционных системах работают именно с такой структурой данных [10]. Поэтому в данной статье в качестве деревьев в предлагаемой структуре будут использованы  $B^+$ -деревья. Подробнее о генерации таких деревьев рассказано в [11].

$B^+$ -дерево благодаря своей структуре поддерживает дубликаты ключей, однако при большом количестве дубликатов использовать такой индекс становится менее эффективно, поскольку для поиска конкретного идентификатора кортежа с одинаковыми ключами в индексе для худшего случая необходимо перебрать все элементы, подходящие под заданное условие поиска [9]. В данной работе предполагается альтернативный подход, основывающийся на предположении о том, что количество уникальных элементов невелико относительно общего количества элементов.

### Алгоритм поиска

При инициализации индексной структуры передаются следующие параметры: количество бит для хранения типа значения индекса, равного размеру типа, умноженному на 8 бит (обозначим как  $SizeOfT$ ); количество битовых масок (обозначим как  $BitmapAmount$ ); массив числа бит, используемых в каждой битовой маске (обозначим как  $BitmapParts_i$ ).

Для составления битовой маски происходит сдвиг всех байт в числе  $-1$  на  $(SizeOfT - BitmapParts_i)$

бит вправо, а затем на  $\sum_{j=1}^i BitmapParts_j$  бит влево. По-

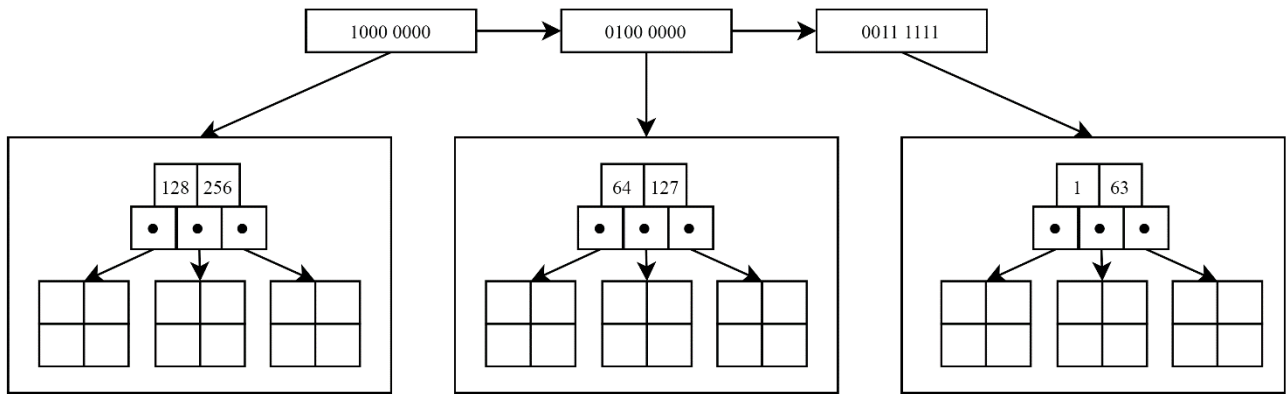
сле этого происходит инициализация  $B^+$ -дерева, которому сопоставляется битовая маска.

Алгоритм поиска, какому дереву принадлежит элемент в индексной структуре, следующий:

1. Сначала необходимо выяснить, какому дереву принадлежит элемент. Инициализируется переменная  $BTreeIndex$ , хранящая индекс  $B^+$ -дерева, в котором будет осуществляться поиск элемента.

2. Если искомым элемент равен нулю, то в переменную  $BTreeIndex$  записывается индекс последнего дерева, алгоритм завершает работу.

3. В цикле по  $i$  от одного до  $BitmapAmount$  осуществляется конъюнкция над поисковым элементом и битовой маской.

Рис. 1. Структура иерархического битового индекса с тремя  $B^+$ -деревьями

4. Если результат не равен нулю, то элемент принадлежит данному дереву: индекс битовой маски  $i$  сохраняется в переменную  $BTreeIndex$ .

5. Иначе переменная  $i$  инкрементируется, происходит возврат к шагу 2.

Если элемент равен нулю, то он принадлежит последнему  $B^+$ -дереву. Это сделано потому, что на шаге 3 результат конъюнкции проверяется на равенство нулю; а элемент, равный нулю, данную проверку не проходит.

Также в данном алгоритме ключ не может принадлежать сразу нескольким  $B^+$ -деревьям: элемент может соответствовать сразу нескольким битовым маскам, но выбирается дерево, битовая маска которого проверена первой, т.е. справедлива формула

$$\mathit{bitmap}_i \geq \mathit{bitmap}_{i+1}, i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $\mathit{bitmap}_i$  –  $i$ -я битовая маска,  $N$  – количество битовых масок.

Для добавления, удаления, изменения или поиска элемента необходимо найти битовую карту, которой соответствует ключ, и осуществить соответствующую операцию в  $B^+$ -дереве, которому соответствует битовая маска.

Время поиска в  $B^+$ -дереве в лучшем случае равно

$$O(\log_{t_i} n_i), \quad (2)$$

где  $t_i$  – порядок дерева,  $n_i$  – количество ветвей в узлах  $i$ -го  $B^+$ -дерева.

В худшем случае, когда все элементы индекса сконцентрированы в единственном  $B^+$ -дереве, скорость равна

$$O(\log_{t_i} n_i + N), \quad (3)$$

где  $N$  – количество битовых масок.

#### Обработка дубликатов ключей

Данный индекс хорошо подходит для случая с высокой селективностью запроса, когда в индексе хранится большое количество уникальных значений [12–15]. Однако в случае, когда большинство значений индекса не уникальные, данный алгоритм не даёт никаких преимуществ.

Для этого, чтобы увеличить скорость поиска элементов в случае низкой селективности, можно реорганизовать структуру индекса так, чтобы вместо битовых масок использовались все уникальные значения, а в  $B^+$ -деревьях в свою очередь хранились бы идентификаторы строк таблицы базы данных.

На рис. 2 представлена организация индексной структуры для 10 уникальных элементов. На первом уровне индекс содержит уникальные ключи, отсортированные по возрастанию (в данном примере от одного до 10). В качестве ключей  $B^+$ -дерева теперь хранятся не ключи атрибута, а значения первичного ключа таблицы либо идентификатора кортежа таблицы ( $RowID$ ) в случае его отсутствия.

Теоретически это даёт выигрыш в скорости поиска ввиду того, что значения первичных ключей или  $RowID$  отсортированы в каждом  $B^+$ -дереве, а также того, что деревья проиндексированы по значению атрибута.

Алгоритм поиска одного конкретного элемента изменится на следующий. На вход алгоритма поступают параметры: ключ атрибута (обозначим как  $Key$ ), значение атрибута (обозначим как  $Value$ ).

1. Необходимо найти индекс  $B^+$ -дерева. Для этого составляется цикл по  $i$  от 1 до количества  $B^+$ -деревьев в индексной структуре.

2. На  $i$ -м шаге производится конъюнкция переменной  $Key$  с битовой маской. Индекс считается найденным, если результат операции ненулевой.

3. Если индекс  $B^+$ -дерева найден, то переход к шагу 5.

4. Если за все шаги цикла индекс  $B^+$ -дерева не найден, то элемент не найден и поиск завершается неудачно.

5. Производится поиск в  $B^+$ -дереве элемента с ключом  $Value$ . Если элемент найден, то поиск завершается успешно и возвращается значение элемента, иначе поиск завершается неудачно.

Для оценки влияния на производительность данного алгоритма необходимо сравнить скорость поиска в иерархическом индексе со случаем, когда все элементы сосредоточены в одном  $B^+$ -дереве. Также необходимо оценить количество операций ввода-вывода с дискового накопителя для обоих случаев.

С учётом дубликатов скорость поиска элемента в обычном  $B^+$ -дереве равна

$$O(\log_t n + k), \quad (4)$$

где  $t$  – порядок дерева,  $n$  – количество ветвей в узлах дерева,  $k$  – количество элементов, встречающихся в пределах диапазона.

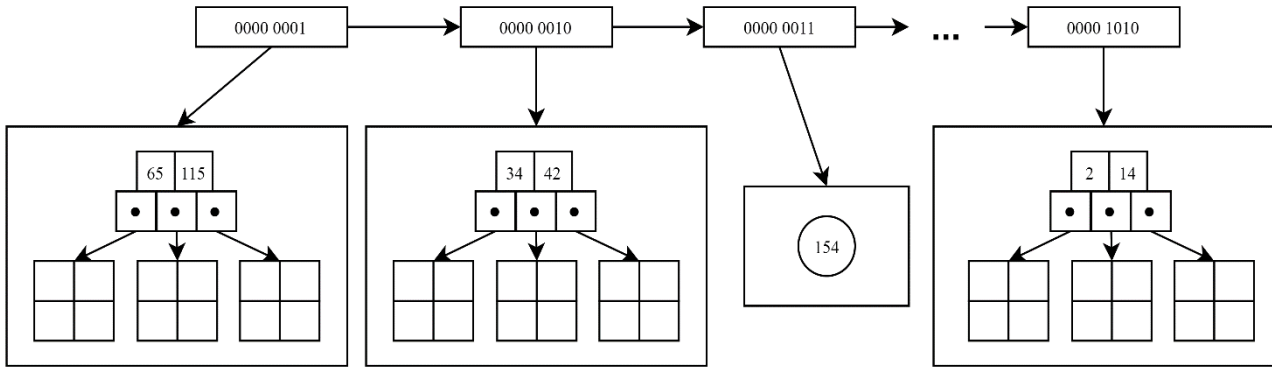


Рис. 2. Организация индексной структуры для 10 уникальных элементов

«Количество обращений к диску, необходимое для выполнения большинства операций с  $B^+$ -деревом, пропорционально его высоте» [16].

Для  $B^+$ -дерева справедлива следующая теорема: «Если  $n \geq 1$ , то для  $B^+$ -дерева с  $n$  узлами и минимальной степенью  $t \geq 2$  справедливо следующее неравенство [16]»:

$$h \leq \log_t \frac{n+1}{2}, \tag{5}$$

где  $h$  – высота дерева,  $n$  – количество элементов в дереве.

Сравнительная таблица скорости поиска для обычного  $B^+$ -дерева и НВИ представлена в табл. 1, количества операций ввода-вывода – в табл. 2.

Таблица 1  
Сравнительная таблица скорости поиска в  $B^+$ -дереве и НВИ

$B^+$	$B^+$ с дубликатами	$B^+$ поиск по диапазону
$O(\log_t n)$	$O(\log_t n + d)$	$O\left(\log_t n + k\right)$
НВИ	НВИ с дубликатами	НВИ поиск по диапазону
$O\left(\log_{t_i} n_i + N\right)$	$O\left(\log_{t_i} n_i + d + N\right)$	$O\left(a * \log_{t_i} n_i + k + N\right)$

Таблица 2  
Сравнительная таблица количества операций ввода-вывода при поиске в  $B^+$ -дереве и НВИ

Случай / тип дерева	$B^+$	$B^+$ с дубликатами	$B^+$ поиск по диапазону
Худший случай	$h$	$h + \frac{d}{t}$	$\frac{n}{t}$
Лучший случай	$h$	$h + \frac{d}{t}$	$h + \frac{k}{t}$
	НВИ	НВИ с дубликатами	НВИ поиск по диапазону
Худший случай	$h_i + B_m$	$h_i + \frac{d}{t_i} + B_m$	$\left[\sum_{i=1}^a h_i\right] + \frac{k}{t_i} + B_m$
Лучший случай	$h_i$	$h_i + \frac{d}{t_i}$	$h_i + \frac{k}{t_i}$

Используемые обозначения в таблицах даны ниже.  
Глубина  $i$ -го  $B^+$ -дерева

$$h_i = \log_{t_i} \frac{n_i + 1}{2}, \tag{6}$$

где  $t_i$  – порядок  $i$ -го  $B^+$ -дерева,  $n_i$  – количество элементов в  $i$ -м  $B^+$ -дереве,  $n_i \leq n$ .

Количество блоков для хранения всех битовых масок

$$B_m = \frac{N * BTreePointerSize}{BlockSize}, \tag{7}$$

где  $N$  – количество  $B^+$ -деревьев,  $N \geq 1$ ,  $BTreePointerSize$  – размер указателя на  $B^+$ -дерево,  $BlockSize$  – размер блока для хранения внутренних и листовых узлов  $B^+$ -дерева.

Количество  $B^+$ -деревьев, в которых располагаются значения, подходящие под диапазон:

$$1 \leq a \leq N, \tag{8}$$

$d$  – количество дубликатов ключей.

Подробнее о вычислении порядка  $B^+$ -дерева описано в работах [16–18].

Предполагается, что битовые маски с указателями на  $B^+$ -дерево хранятся в виде линейного списка в блоках индекса вместе с остальными данными.

Из сравнительных таблиц видно, что при использовании иерархического индекса в худшем случае необходимо обработать всего лишь одно  $B^+$ -дерево при поиске одного элемента, глубина которого будет меньше, чем глубина одного  $B^+$ -дерева, в котором хранятся все ключи, т.е.  $h_i \leq h$ . Следовательно, теоретически скорость поиска элемента увеличивается.

Однако при поиске диапазона значений придётся так или иначе прибегнуть к поиску элемента во всех сопутствующих деревьях, ключи которых удовлетворяют битовой маске, максимальное значение которых равно  $a$ . В лучшем случае  $a \leq 2$  (искомые значения вполне могут храниться в одном блоке индекса), в худшем  $a = N$ .

Тем не менее существует потенциальный выигрыш в количестве операций ввода-вывода. Предположим, что размер блока равен 1 024 байта, на хранение битовой маски выделено четыре байта, всего масок 100. Таким образом, для хранения всех масок необходим один блок. Тогда для случая равномерного распределения ключей в индексе справедливо соотноше-

ние, представленное в табл. 3. Таким образом, количество операций для поиска элемента в конкретном  $B^+$ -дереве НВИ будет таким же, как если бы все значения располагались в одном дереве.

С учётом минимум одной операции ввода-вывода для получения указателя на нужное дерево поиска получим соотношение  $h \geq h_i + N$  для  $N \leq 2$  и  $h < h_i + N$  для  $N > 2$ .

Таблица 3  
Соотношение количества операций ввода-вывода для обычного  $B^+$ -дерева и НВИ

$n$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$	$10^9$
$n_i$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$
$\log_{t_i} n_i$	1,44	1,97	2,51	3,04	3,57
$h_i$	3	3	4	5	5
$\log_t n$	2,51	3,04	3,57	4,11	4,64
$h$	3	4	4	5	5

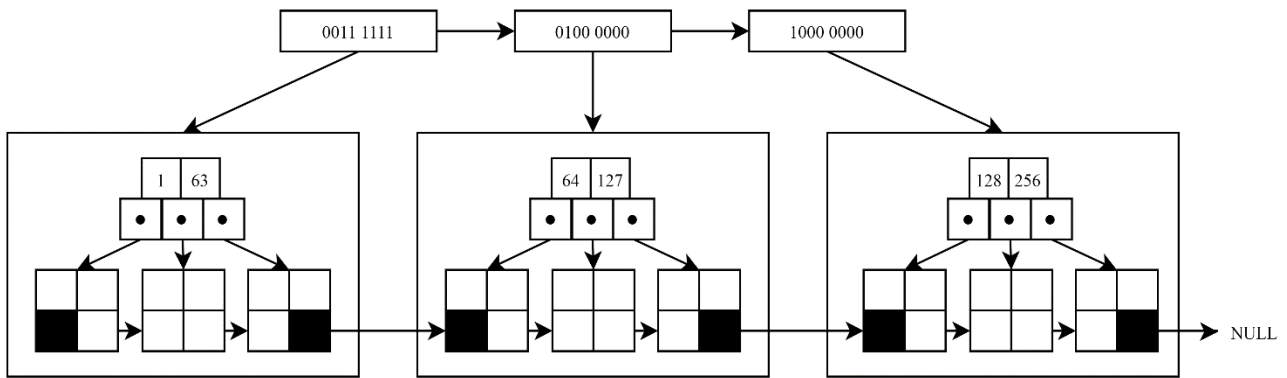
Следует учитывать, что  $N$  может быть нулевым, если в оставшейся части блока с битовыми масками хранятся значения  $B^+$ -дерева, либо если принять допущение о том, что индексная структура при инициализации обращается к диску для чтения битовых масок только один раз, а в остальное время выбирает их

из основной памяти. В таком случае справедливо  $h > h_i$ . Из этого соотношения следует, что в лучшем случае существует небольшой прирост производительности при использовании НВИ, однако в худшем случае преимущество всё ещё будет на стороне обычного  $B^+$ -дерева.

**Добавление ссылок на соседние деревья**

В  $B^+$ -деревьях для быстрого поиска диапазона элементов листовые узлы хранят внутри себя ссылки на соседние листовые узлы, которые хранят значения [16]. На программном уровне это можно реализовать с помощью связанных списков, данные которых хранятся в виде блоков одинакового размера в одном или нескольких файлах в файловой системе. В процессе поиска нижней границы диапазона находится смещение в файле, указывающее на начальный листовой узел; далее для поиска всего диапазона требуется лишь продвигаться дальше по блокам, проверяя элементы в каждом узле на принадлежность диапазону.

Поскольку для поиска по диапазону в НВИ необходимо в худшем случае обратиться к каждому  $B^+$ -дереву по отдельности, то в крайних листовых узлах  $B^+$ -дерева можно добавить ссылки, указывающие на начало соседнего  $B^+$ -дерева (рис. 3).



NULL – указатель на несуществующее дерево Рис. 3. НВИ с добавлением ссылок на соседние  $B^+$ -деревья

В таком случае для поиска диапазона элементов можно начать поиск в дереве с левой границы диапазона, после чего, двигаясь к следующим элементам и достигнув границы дерева, обратиться по ссылке к началу соседнего дерева и продолжить поиск элементов в нём.

Необходимо заметить, что в данной организации индексной структуры битовые маски рассчитываются по иному алгоритму: сначала идут маски, указывающие на  $B^+$ -деревья с меньшими элементами.

Следовательно, алгоритмическая сложность поиска диапазона элементов в худшем случае равна

$$O(\log_{t_i} n_i + k + N), \tag{9}$$

где  $t_i$  – порядок  $B^+$ -дерева, битовая маска которого удовлетворяет нижней границе диапазона;  $n_i$  – количество элементов в данном  $B^+$ -дереве,  $n_i \leq n$ ;  $k$  – диапазон поиска;  $N$  – количество  $B^+$ -деревьев, в которых содержится искомый диапазон значений.

В лучшем случае  $N = 1$ ; следовательно, сложность для лучшего случая равна

$$O(\log_{t_i} n_i + k + 1). \tag{10}$$

Количество операций ввода-вывода для поиска по диапазону в худшем случае будет равно

$$h_i + \frac{d}{t_i} + Bm. \tag{11}$$

В лучшем случае  $Bm = 0$ , поэтому количество операций ввода-вывода для лучшего случая равно

$$h_i + \frac{d}{t_i}. \tag{12}$$

**Реализация индексной структуры на языке программирования C#**

Для проверки данной математической модели на практике разработана программа на языке программирования C#. В рамках данной программы реализовано две модификации: добавления ссылок на соседние  $B^+$ -деревья и группировки значений по ключу.

Принципиальное различие двух модификаций заключается в том, что во второй модификации ключи ссылаются на  $B^+$ -дерево со всеми значениями,

которые соответствуют данному ключу, а в самих  $B^+$ -деревьях в качестве ключей выступают искомые значения. Пример: в таблице с девятью миллионами кортежей есть столбец, в котором всего десять уникальных значений (таким образом, значения повторяются 8 999 990 раз). При заполнении индекса создаются 10 отдельных деревьев (по каждому дереву на одно уникальное значение), каждое значение устанавливается в дерево, в котором и ключом, и значением будет являться устанавливаемое значение.

С помощью данной программы реализованы тесты производительности для установления количества операций ввода-вывода для нахождения одного элемента в случае использования одного  $B^+$ -дерева и иерархического индекса в обеих модификациях, а также тесты для установления количества операций ввода-вывода, затраченных на нахождение нижней границы диапазона элементов.

Идея последнего теста состоит в том, что в первой модификации общее количество операций ввода-вывода для поиска всех элементов в диапазоне останется почти тем же, однако затраты на поиск уменьшаются именно за счёт уменьшения количества операций при нахождении начала диапазона.

Каждый тест был запущен 10 раз на одном ядре процессора. Для прогрева кэша процессора каждая операция была запущена несколько раз в течение 1 200 мс. Подробнее о проведении замеров производительности на языке программирования C# рассказано в [19–20].

Для тестов производительности промоделирован случай нормального распределения значений; тип данных для хранения ключей и значений – целочисленный (32 бита), значения генерируются в пределах от 1 до 2 147 483 647 (верхняя граница целочисленного четырёхбайтового типа). Для модификации, предполагающей добавление ссылок на соседние деревья, значения распределены по 5 деревьям в НВИ; распределение их битовых масок представлено в табл. 4. Для модификации, предполагающей группировку по уникальным значениям, все элементы

распределены по 10 деревьям, что соответствует 10 уникальным элементам в столбце таблицы.

Таблица 4

**Распределение битовых масок в НВИ**

Номер дерева	Битовая маска $B^+$ -дерева
1	0111 1110 0000 0000 0000 0000 0000 0000
2	0000 0001 1111 1000 0000 0000 0000 0000
3	0000 0000 0000 0111 1111 0000 0000 0000
4	0000 0000 0000 0000 0000 1111 1100 0000
5	0000 0000 0000 0000 0000 0000 0011 1111

Для поиска одного элемента в НВИ для модификации добавления ссылок на соседние деревья проверено два условия: в лучшем случае по той части индекса, элементов в которой минимальное количество, а для худшего случая – максимальное. Эти же условия проверены для поиска диапазона элементов: в модификации группировки по ключам при поиске были взяты все элементы из нескольких разных групп, что соответствует запросу «найти все идентификаторы строк таблицы, у которых значение столбца равно одному или множеству значений».

Результаты запуска тестов производительности приведены в табл. 5, графики зависимости скорости поиска от количества элементов в деревьях представлены на рис. 4 и 5.

Из полученных результатов теста производительности видно, что количество операций для нахождения одного элемента уменьшилось на два в лучшем случае, а для худшего случая соразмерно одному  $B^+$ -дереву. Результаты соответствуют полученным в табл. 3 математически.

Разница в скорости поиска в обеих структурах (см. рис. 4) для первой модификации есть только на уровне погрешности: как показал результат, она почти не даёт никакого выигрыша в скорости. Однако для модификации группировки по ключам есть почти двукратный прирост в скорости поиска (см. рис. 5). На этом рисунке не показана скорость для 50 миллионов значений: для  $B^+$ -дерева затраченное время составило 30 756 мс, для НВИ – 15 527 мс.

Таблица 5

**Результаты запуска тестов производительности**

Модификация	Количество элементов (без дубликатов)	Количество операций для поиска одного элемента			Количество операций для поиска нижней границы диапазона	
		Одно $B^+$ дерево	НВИ		Одно $B^+$ дерево	НВИ
			Худший случай	Лучший случай		
С добавлением ссылок на соседние деревья	10 000	4	3	2	4	2
	100 000	4	4	3	4	3
	500 000	5	4	3	5	3
	1 000 000	5	4	3	5	3
	10 000 000	5	4	4	5	4
	50 000 000	6	4	4	6	4
Группировки значений по ключу	10 000	–	–	–	4	3
	100 000	–	–	–	4	4
	500 000	–	–	–	5	4
	1 000 000	–	–	–	5	4
	10 000 000	–	–	–	6	5
	50 000 000	–	–	–	6	5

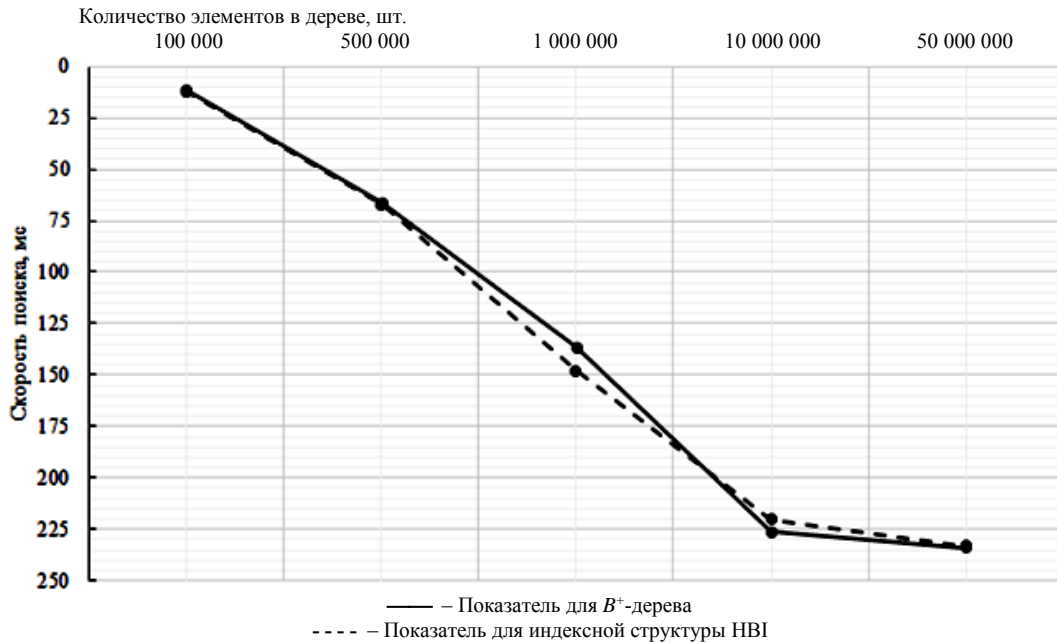


Рис. 4. График зависимости скорости поиска от количества элементов в индексной структуре для модификации НВИ с добавлением ссылок на соседние деревья

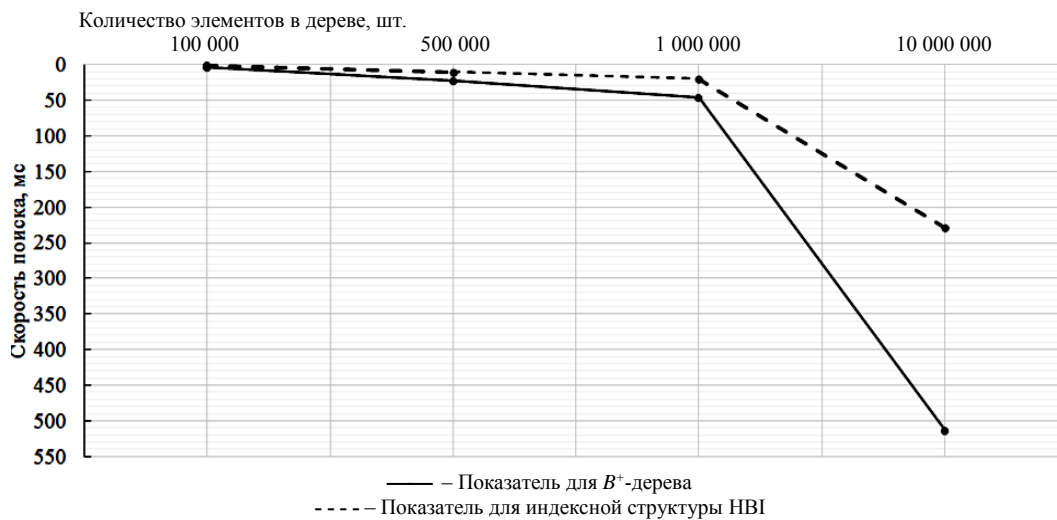


Рис. 5. График зависимости скорости поиска от количества элементов в индексной структуре для модификации НВИ с группировкой значений по ключам

По полученным результатам можно сделать вывод, что модификация, предполагающая группировку значений по ключам индекса, позволяет эффективно работать с большим количеством значений с равными ключами в столбце. Однако это справедливо лишь для небольшого количества уникальных элементов (до 10).

Для модификации, предполагающей соединение  $V^+$ -деревьев путём добавления ссылок на крайние листовые узлы, также существует прирост, но не по скорости, а по количеству операций. Этому есть объяснение: при поиске в данной модификации НВИ осуществляются одни и те же операции, что и в  $V^+$ -дереве. А поскольку ключи распределены равномерно по всем деревьям, следует вывод о том, что в случае поиска одного элемента и поиска диапазона

элементов количество операций ввода-вывода будет меньше, чем в случае хранения всех ключей в одном  $V^+$ -дереве.

#### Заключение

Предложенные модификации иерархического битового индекса демонстрируют прирост производительности по сравнению с обычным  $V^+$ -деревом и могут применяться для повышения производительности поиска в СУБД даже для случая малого количества уникальных значений в искомом столбце.

Данные индексные модификации могут быть использованы во многих областях: например, при разработке геоинформационных систем и приложений для улучшения качества поиска в однородных данных [21, 22].

## Литература

1. Льюис Д. Разбираемся с индексами на основе битовых карт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://citforum.ru/database/oracle/bitmap\\_index/](http://citforum.ru/database/oracle/bitmap_index/), свободный (дата обращения: 02.02.2020).
2. Каратаев Е. MUMPS СУБД: Практика применения и опыт программирования. – М.: Солон-Пресс, 2013. – 550 с.
3. Труб И.И. Иерархические битовые индексы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.osp.ru/os/archive/2018/03/>, свободный (дата обращения: 02.02.2020).
4. Труб И.И. Вероятностная модель иерархических индексов базы данных // Программные системы и вычислительные методы. – 2017. – № 4. – С. 15–31.
5. Иерархический битовый индекс: эффективная и расширяемая техника индексирования для атрибутов ключ–значение / М. Морзи, Т. Морзи, А. Нанопулос, И. Манопоулос // Достижения в базах данных и информационных системах: матер. Седьмой Восточно-европейской конф. – Дрезден: ADBIS, 2003. – Т. 2798. – С. 236–252.
6. Иерархический битовый индекс для индексации пространственных данных / Дж. Чмел, Т. Морзи, Р. Врембел // Хранение данных и обнаружение знаний: матер. Девятой Междунар. конф. – Линц: Lecture Notes in Computer Science, 2009. – Т. 5691. – С. 87–98.
7. Otto E. Accelerating Queries on Very Large Datasets // E. Otto, K. Wu. – Chapman & Hall/CRC, 2010. – 558 p.
8. Scientific Data Management: Challenges, Technology, and Deployment [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.crcpress.com/Scientific-Data-Management-Challenges-Technology-and-Deployment/Shoshani-Rotem/p/book/9780367384760>, свободный (дата обращения: 02.02.2020).
9. Сейджвик, Р. Алгоритмы. – 4-е изд. / Р. Сейджвик, К. Уэйн. – Бостон: Addison-Wesley Professional, 2011. – 976 с.
10. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных / К.Дж. Дейт. – 8-е изд. – М.: ИД «Вильямс», 2005. – 1328 с.
11. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Генерация всех деревьев. История комбинаторной генерации / Д.Э. Кнут. – М.: Вильямс, 2007. – Т. 4. – 160 с.
12. Bitmap-индекс или B\*tree-индекс: какой и когда применять? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://citforum.ru/database/oracle/bb\\_indexes/](http://citforum.ru/database/oracle/bb_indexes/), свободный (дата обращения: 02.02.2020).
13. Чернов А.Ф. Анализ и разработка индекса для поиска последовательностей элементов произвольного типа по их фрагментам в реляционных базах данных: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11 – СПб., 2014. – 156 с.
14. Табличная селективность, индексная селективность, блочная селективность. Базы данных Oracle: Администрирование и программирование СУБД для профи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://oracle-patches.com/oracle/prof/341-tablichnaya-selektivnost-indeksnaya-selektivnost-blochnaya-selektivnost>, свободный (дата обращения: 02.02.2020).
15. Tim Henderson Lessons While Implementing a B+Tree [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hackthology.com/lessons-learned-while-implementing-a-btree.html>, свободный (дата обращения: 02.02.2020).
16. В-дерево – Викиконспекты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=В-дерево>, свободный (дата обращения: 02.02.2020).
17. Асимптотический анализ алгоритмов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/78728/>, свободный (дата обращения: 02.02.2020).
18. Bettyf Langtein Example to calculate the order p of a BTree [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.coursehero.com/file/p2gj1mfj/Example-To-calculate-the-order-p-of-a-B-tree-suppose-the-search-field-is-V-8/>, свободный (дата обращения: 02.02.2020).

19. Introduction to benchmarking C# code with benchmark.NET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.stevejgordon.co.uk/introduction-to-benchmarking-csharp-code-with-benchmark-dot-net>, свободный (дата обращения: 02.02.2020).

20. Learn how to create correct C# benchmarks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://blogs.perpetuumsoft.com/dotnet/learn-how-to-create-correct-c-benchmarks/>, свободный (дата обращения: 02.02.2020).

21. Милихин М.М. Комбинированный метод визуализации картографических данных веб-ориентированной геоинформационной системы / М.М. Милихин, Ю.Б. Грищенко, М.М. Рычагов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 1(35). – С. 112–115.

22. Базовые принципы разработки веб-ориентированных информационных систем управления инфраструктурой социально-экономических и технических процессов / Ю.П. Ехлаков, О.И. Жуковский, П.В. Сенченко, Ю.Б. Грищенко, М.М. Милихин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 63–67.

**Боровской Игорь Георгиевич**

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. экономики, математики и статистики (ЭМИС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID 0000-0003-2707-7203  
Тел.: +7 (382-2) 90-01-85  
Эл. почта: igor.g.borovskoi@tusur.ru

**Харченко Игорь Константинович**

Аспирант каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУР Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID 0000-0003-2702-7230  
Тел.: +7-923-416-09-12  
Эл. почта: igor.k.kharchenko@tusur.ru

Borovskoy I.G., Kharchenko I.K.

**Hierarchical bitmap index modification to improve performance of database management systems**

This paper describes a modification of the bitmap index called the Hierarchical Bitmap Index (HBI), which involves the grouping of index keys and subsequent storage in B<sup>+</sup> trees. Two approaches to the organization of the index structure have been proposed, allowing to increase the productivity in the number of input / output operations.

**Keywords:** hierarchical bitmap index, HBI, algorithms and data structures, B<sup>+</sup> tree, indexing in DBMS, C#.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-65-72

*References*

1. Louis D. Understanding bitmap indices. – Available at: [http://citforum.ru/database/oracle/bitmap\\_index/](http://citforum.ru/database/oracle/bitmap_index/), free (Accessed: February 2, 2020).



2. Karataev E. *MUMPS SUBD: Praktika primeneniya I opit programirovaniya* [MUMPS DBMS: Application practice and programming experience]. Moscow, Solon-Press Publ., 2013. 550 p. (in Russ.).
3. Trub I.I. Hierarchical bitmap indices. – Available at: <https://www.osp.ru/os/archive/2018/03/>, free (Accessed: February 2, 2020).
4. Trub I.I. [A probabilistic model of hierarchical database indices]. *Software systems and computational methods*, 2017, no. 4, pp. 15–31 (in Russ.).
5. Morzy M., Morzy T., Nanopoulos A., Manolopoulos Y. Hierarchical Bitmap Index: an Efficient and Scalable Indexing Technique for Set-Valued Attributes. Proc. of the Advances in Databases and Information Systems, Seventh East European Conference ADBIS 2003, Dresden, Springer Berlin Heidelberg Publ., 2003, vol. 2798, pp. 236–252.
6. Chmiel J., Morzy T., Wrembel R. HOBI: Hierarchically Organized Bitmap Index for Indexing Dimensional Data. Proc. of the Eleventh International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery (DaWaK). Springer Berlin Heidelberg Publ., 2009, vol. 5691, pp. 87–98.
7. Otto E., Wu K. *Accelerating Queries on Very Large Datasets*. London, Chapman & Hall/CRC Publ., 2010. 558 p.
8. Scientific Data Management: Challenges, Technology, and Deployment. – Available at: <https://www.crcpress.com/Scientific-Data-Management-Challenges-Technology-and-Deployment/Shoshani-Rotem/p/book/9780367384760>, free (Accessed: February 2, 2020).
9. Sedgewick R., Wayne K. *Algorithms*. 4th Edition. Boston: Addison-Wesley Professional Publ., 2011. 976 p.
10. Deit, K., Dzh. *Vvedeniye v sistemy baz dannykh* [An introduction to database management systems]. Moscow, Williams Publ., 2005. 1328 p. (in Russ.).
11. Knuth, D.E. *Iskusstvo programirovaniya. Generatsiya vseh dereviev. Istoriya kombinatornykh generatsiy* [The art of programming. Generation of all trees. The history of combinatorial generation]. Moscow, Williams Publ., 2007, 160 p. (in Russ.).
12. Bitmap-index or B\*tree-index: which and when to use? Available at: [http://citforum.ru/database/oracle/bb\\_indexes/](http://citforum.ru/database/oracle/bb_indexes/), free (Accessed: February 2, 2020).
13. Chernov A.F. *Analiz i razrabotka indeksa dlya poiska posledovatel'nostey elementov proizvol'nogo tipa po ikh fragmentam v relyatsionnykh bazakh dannykh. Diss. kand. nauk* [Analysis and development of an index for searching sequences of elements of an arbitrary type by their fragments in relational databases. Cand. Diss.]. Saint-Petersburg, 2014. 156 p. (in Russ.).
14. Table selectivity, index selectivity, block selectivity. Oracle Databases. Administration and programming of DBMS for professionals. Available at: <https://oracle-patches.com/oracle/prof/341-tablichnaya-selektivnost-indeksnaya-selektivnost-blochnaya-selektivnost>, free (Accessed: February 2, 2020).
15. Tim Henderson Lessons While Implementing a B+Tree. Available at: <https://hackthology.com/lessons-learned-while-implementing-a-btree.html>, free (Accessed: February 2, 2020).
16. B-tree – Wikiconspects. Available at: <https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=B-дерево>, free (Accessed: February 2, 2020).
17. Asymptotic Analysis of Algorithms. – Available at: <https://habr.com/ru/post/78728/>, free (Accessed: February 2, 2020).
18. Bettyf Langtein Example to calculate the order p of a BTree. Available at: <https://www.coursehero.com/file/p2gj1mfj/Example-To-calculate-the-order-p-of-a-B-tree-suppose-the-search-field-is-V-8/>, free (Accessed: February 2, 2020).
19. Introduction to benchmarking C# code with benchmark .NET. Available at: <https://www.stevejgordon.co.uk/introduction-to-benchmarking-csharp-code-with-benchmark-dot-net>, free (Accessed: February 2, 2020).
20. Learn how to create correct C# benchmarks. Available at: <http://blogs.perpetuumsoft.com/dotnet/learn-how-to-create-correct-c-benchmarks/>, free (Accessed: February 2, 2020).
21. Milikhin M.M., Gritsenko Y.B., Rychagov M.M. [Combined geospatial data visualization method for web-based geographic information system]. *TUSUR reports*, 2015, no. 1, pp. 112–115 (in Russ.).
22. Ekhlakov Y.P., Zhukovskiy O.I., Senchenko P.V., Gritsenko Y.B., Milikhin M.M. [Basic principles of developing web-oriented information systems for managing the infrastructure of socio-economic and technical processes]. *TUSUR reports*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 63–67 (in Russ.).

---

#### Igor G. Borovskoy

Doctor of Physics and Mathematics, Professor,  
Department of Economics, Mathematics and Statistics,  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID 0000-0003-2707-7203  
Phone: +7 (382-2) 90-01-85  
Email: igor.g.borovskoi@tusur.ru

#### Igor K. Kharchenko

Postgraduate student, Department of Automated Control  
Systems TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID 0000-0003-2702-7230  
Phone: +7-923-416-09-12  
Email: igor.k.kharchenko@tusur.ru

УДК 519.224.22, 519.246.8

**А.Е. Барышева, А.С. Марков, А.А. Мицель**

## Модель оценки долгосрочной корреляции активов портфеля

Представлен новый подход к оценке корреляции приращений активов в портфеле, который позволяет получить оценку долгосрочной корреляции на базе краткосрочной, в том числе в условиях ограниченного количества доступных наблюдений. Данное преимущество подхода дает возможность оценить долгосрочную корреляцию для низколиквидных финансовых инструментов, а также для инструментов, не обладающих длинной историей в силу недавнего присутствия на рынке. В рамках данного исследования была проведена процедура проверки сходимости оценки параметров предлагаемой модели к истинным значениям при росте числа наблюдений. Апробация модели на реальных данных позволила получить кривую зависимости корреляции изменений стоимостей активов портфеля от временного интервала, на которых эти приращения рассчитываются, для акций трех российских компаний. Также была получена оценка месячной матрицы корреляций для портфеля из рассматриваемых активов.

**Ключевые слова:** долгосрочная корреляция, портфельное управление, моделирование матрицы корреляций.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-73-80

Целью большинства инвесторов является увеличение доходности их портфеля при заданном уровне риска. Для достижения этой цели одни фокусируются на определенном классе ценных бумаг или инвестиционной стратегии, в то время как другие отдают предпочтение политике распределения активов внутри портфеля. Главными факторами, принимаемыми во внимание при формировании нового или изменении текущего портфеля, являются показатели риска и доходности индивидуальных активов, а также метрики связи между изменениями их стоимостей. Если измерение риска и доходности активов осуществляется с помощью обширного набора различных подходов [1–5], то взаимосвязи между активами традиционно принято описывать при помощи матрицы корреляций. Успешность оценки матрицы корреляций во многом определяет и успешность её использования в прикладных финансовых задачах, таких как диверсификация портфеля. Проблема оценки матрицы корреляций является нетривиальной, и ей посвящено множество научных трудов в сфере финансового анализа [6–10].

В классической портфельной теории «Марковица» [11] матрица корреляций доходностей оценивается на исторических данных и далее используется для формирования оптимального портфеля с требуемыми показателями риск/доходность. Важно заметить, что одно из свойств случайных процессов, которые укладываются в классическую портфельную теорию, заключается в том, что корреляция приращений активов инвариантна относительно длины временного интервала, на котором рассматриваются приращения. Благодаря этому среднее, дисперсию и корреляцию можно оценивать на более коротких временных интервалах, а затем масштабировать на любой горизонт.

Однако на практике зачастую наблюдается увеличение корреляции между изменениями стоимости финансовых инструментов при увеличении временного интервала, на котором эти изменения рассматриваются [12]. С точки зрения функционирования

рынка, логичным объяснением такого поведения корреляции является тот факт, что влияние активности участников рынка на изменение стоимости финансовых инструментов тем выше, чем меньше рассматриваемый временной интервал, и, как следствие, составляющая сигнала, отвечающая за свойства самого процесса, просматривается не так сильно. Нарушение предположения об инвариантности корреляции приращений активов относительно длины временного интервала в модели данных приводит к усложнению использования существующих подходов к формированию оптимального портфеля. И, несмотря на то, что данная проблема не является новой (еще в 1979 г. автор [12] описывал разницу в полученной оценке корреляции активов в зависимости от длины временного интервала), задача оценки долгосрочной корреляции остается открытой.

В настоящей работе авторы предлагают модель, с помощью которой оценку долгосрочной корреляции можно производить на базе краткосрочной.

### Постановка проблемы

Зависимость корреляции изменений стоимостей активов от временного интервала усложняет процедуру управления портфелем в первую очередь потому, что значительно усложняется модель изменения стоимости базовых активов. Построение модели данных, учитывающей такое поведение корреляции, имеет ряд особенностей. Во-первых, при моделировании матрицы корреляций необходимо соблюдение ее основных свойств – матрица должна быть положительно определена и симметрична. При использовании аналитического подхода к оценке матрицы корреляций данные свойства не нарушаются, однако на практике аналитическое решение такой задачи существует не всегда и исследователи прибегают к численным методам. Использование численных методов уже не гарантирует сохранность основных свойств корреляционной матрицы и зачастую требует применения дополнительных процедур, таких как сглаживание [13], для получения правильной корреляционной структуры.

Во-вторых, целью долгосрочных инвесторов, как правило, является формирование надежного портфеля, который сможет выдержать цикличность рынка. Очевидно, что для таких задач важно иметь оценку долгосрочной корреляции, которая отражает ту самую цикличность [14]. Для получения статистически устойчивой оценки долгосрочной корреляции, которую часто рассчитывают на базе месячных доходностей активов, необходим довольно длительный исторический период. Например, за двадцать лет наблюдений можно получить ряд месячных доходностей (на непересекающихся интервалах) размером лишь в двести сорок точек. Если же рассматривать дневные доходности на таком же интервале, то число наблюдений увеличится до пяти тысяч. Используя меньший временной интервал для расчета доходностей, можно не только сохранить больше информации о движении стоимости активов, но и получить статистически устойчивую оценку корреляции.

Модель, представленная в данной работе, дает ответ на вопрос, как оценить долгосрочную корреляцию активов в условиях недостаточности выборки, имея устойчивую оценку краткосрочной корреляции.

#### Описание модели

Представим цену актива, наблюдаемую на рынке, в виде суммы двух составляющих: справедливой цены актива, которая определяется макроэкономической ситуацией, состоянием эмитента и другими объективными факторами, и рыночного шума. Под рыночным шумом понимается сдвиг рыночной цены относительно справедливой цены, который обусловлен активностью участников рынка, не связанной с объективными факторами. Примерами такой активности могут быть спекулятивные сделки или мошенничество. Итак, пусть цена актива  $\hat{P}_t$  равна:

$$\hat{P}_t = P_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $\hat{P}_t$  – справедливая цена актива,  $\varepsilon_t$  – рыночный шум.

Тогда изменение в стоимости актива можно записать в следующем виде:

$$\hat{y}_t(\tau) = (\hat{P}_{t+\tau} - \hat{P}_t) = (P_{t+\tau} - P_t) + (\varepsilon_{t+\tau} - \varepsilon_t) = X_t(\tau) + \eta_t(\tau), \quad (2)$$

где  $\hat{y}_t(\tau)$  – наблюдаемое изменение стоимости актива за время  $\tau$ ,  $X_t(\tau)$  – изменение справедливой стоимости,  $\eta_t(\tau)$  – рыночный эффект (изменение стоимости, вызванное рыночным шумом).

Сформулируем ряд предположений модели:

1. Интенсивность рыночного шума со временем не изменяется:

$$D(\varepsilon_t) = \sigma^2(\varepsilon_t) = \text{const}, \quad (3)$$

где  $D(\cdot)$  – дисперсия,  $\sigma(\cdot)$  – стандартное отклонение.

Другими словами, шум не имеет накопительного эффекта, он всегда носит локальный характер. Данное предположение означает, что интенсивность

рыночного эффекта также не зависит от времени, т.е.  $D(\eta_t) = \text{const}$ .

Введем функцию  $\lambda(\tau)$ , описывающую отношение амплитуды рыночного эффекта к амплитуде фактического изменения стоимости актива за период  $\tau$ :

$$\lambda(\tau) = \frac{\sigma^2(\eta_t(\tau))}{\sigma^2(X_t(\tau))}. \quad (4)$$

Так как неопределенность в отношении изменения справедливой стоимости актива растет с ростом  $\tau$ , а дисперсия рыночного эффекта постоянна (следствие из (3)), то  $\lambda(\tau)$  – есть убывающая функция следующего вида:

$$\lambda(\tau) = \frac{\sigma^2(\eta_t(\tau))}{\sigma^2(X_t(\tau))} > \frac{\sigma^2(\eta_t(S))}{\sigma^2(X_t(S))} = \lambda(S), \tau < S. \quad (5)$$

2. Изменения справедливой стоимости актива на временных интервалах разной длины имеют одинаковую корреляцию:

$$r(X_t(\tau)) = r(X_t(S)), \forall \tau, S. \quad (6)$$

Данное предположение автоматически выполняется для процессов с независимыми приращениями.

3. Рыночный шум  $\varepsilon_t$  и стоимость актива  $P_v(\tau)$  не зависят для любых  $t$  и  $v$ .

4. Математическое ожидание рыночного шума равно нулю, т.е. рыночный шум не может задавать тренд в изменении цены актива:

$$E(\varepsilon_t(\cdot)) = 0. \quad (7)$$

Используя сформулированные предположения, рассчитаем корреляцию между двумя активами  $i, j$ . Коэффициент корреляции можно записать в следующем виде:

$$r_{i,j}(\tau) = \frac{E\left(\left(y_t^i(\tau) - E(y_t^i(\tau))\right)\left(y_t^j(\tau) - E(y_t^j(\tau))\right)\right)}{\sigma(y_t^i(\tau))\sigma(y_t^j(\tau))} = \frac{r_{X_{i,j}(\tau)}}{\sqrt{(1+\lambda_i(\tau))(1+\lambda_j(\tau))}}, \quad (8)$$

где  $E(\cdot)$  – математическое ожидание,  $y_t^i(\tau)$  – приращение стоимости актива  $i$  в момент времени  $t$  за период  $\tau$ ,  $\sigma(\cdot)$  – стандартное отклонение,  $\lambda_{i/j}(\tau)$  – лямбда-функция для актива  $i/j$  за период  $\tau$ ,  $r_{X_{i,j}(\tau)}$  – корреляция между изменениями в справедливой цене активов  $i, j$  за время  $\tau$ .

Так как влияние рыночного шума не зависит от времени, функция  $\lambda_t(\tau)$  может быть представлена в следующем виде:

$$\lambda_i(\tau) = \frac{\sigma^2(\eta_t^i(\tau))}{\sigma^2(X_t^i(\tau))} = \frac{c_i}{\tau}, \quad (9)$$

где  $c_i$  – параметр функции лямбда для актива  $i$ .

Чтобы избавиться от неизвестной корреляции между изменениями в справедливой цене активов в уравнении (8), введем понятие коэффициента отношения корреляций. Коэффициент отношения корреляций  $R(\tau)$  представляет собой коэффициент отношения корреляций рассматриваемых активов  $i, j$  для разных временных интервалов и может быть рассчитан по следующей формуле:

$$R(\tau) = \frac{r_{i,j}(\tau)}{r_{i,j}(\tau_{long})} = \sqrt{\frac{(1+\lambda_i(\tau_{long}))(1+\lambda_j(\tau_{long}))}{(1+\lambda_i(\tau))(1+\lambda_j(\tau))}}, \quad (10)$$

где  $r_{i,j}(\tau)$  – оценка корреляции между активами  $i, j$ , рассчитанная на приращениях периода  $\tau$ ,  $r_{i,j}(\tau_{long})$  – оценка корреляции между активами  $i, j$ , рассчитанная на приращениях более длительного периода.

**Оценка параметров модели по эмпирическим данным**

Для оценки параметров модели  $c_i (i=1, \dots, n)$  на основе эмпирических данных возможно использование различных критериев. Поскольку основная практическая ценность состоит в возможности оценивать долгосрочную корреляцию из краткосрочной, предлагается подбирать параметры  $c_i (i=1, \dots, n)$  таким образом, чтобы минимизировать расстояние между эмпирическими и теоретическими отношениями корреляций всех активов для всего набора рассматриваемых временных интервалов, а именно:

$$\sum_{m,k} \sum_{\substack{i,j \\ k < m < j < i}} \left( \frac{\hat{r}_{i,j}(\tau_k)}{\hat{r}_{i,j}(\tau_m)} - \sqrt{\frac{(1+\frac{c_i}{\tau_m})(1+\frac{c_j}{\tau_m})}{(1+\frac{c_i}{\tau_k})(1+\frac{c_j}{\tau_k})}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

$k, m = 1, \dots, l,$   
 $i, j = 1, \dots, n,$

где  $n$  – количество инструментов в портфеле,  $l$  – количество рассматриваемых временных интервалов для расчета приращений,  $\hat{r}_{i,j}$  – эмпирическая оценка корреляции.

**Тестирование метода оценки параметров**

Задача оптимизации (11) не имеет аналитического решения, поэтому показать, что в теории с ростом числа наблюдений оценки параметров модели сходятся к истинным значениям, не представляется возможным. В связи с этим для проверки сходимости предлагаемого метода калибровки был проведен численный эксперимент на синтетических данных, полученных посредством имитационного моделирования.

Эксперимент включает в себя выполнение следующих шагов:

1. Генерация приращений справедливых цен активов  $X_i$  как коррелированных винеровских процессов с матрицей корреляции

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{X_{1,2}} & \dots & \rho_{X_{1,n}} \\ \rho_{X_{1,2}} & 1 & \dots & \rho_{X_{2,n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{X_{1,n}} & \rho_{X_{2,n}} & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

нулевыми средними и стандартными отклонениями  $\sigma_i (i=1, \dots, n)$ , где  $n$  – количество инструментов в портфеле.

2. Генерация рыночного эффекта  $\eta_i$  для каждого из активов как приращения случайной гауссовой величины со стандартным отклонением  $\sigma_\epsilon^i$ .

3. Расчет вектора истинных параметров модели  $c^{theor}$  для каждого из активов по формуле (9).

4. Оценка параметров модели  $c^{estim}$  на синтетических данных, полученных посредством имитационного моделирования, путем решения задачи оптимизации (11).

5. Расчет погрешности оценки для каждого параметра  $c_i$  по следующей формуле:

$$\Delta c_i = \left( \frac{c_i^{theor}}{c_i^{estim}} - 1 \right) \times 100\%. \quad (12)$$

6. Расчет суммарной ошибки оценки матрицы корреляций месячных изменений стоимостей активов, рассчитанной на базе однодневных корреляций при использовании оценок параметров  $c_i^{estim}$ :

$$\Delta \Sigma = \sum_{\substack{i,j \\ j < i}} \frac{|r_{i,j} - \hat{r}_{i,j}|}{r_{i,j}}, \quad (13)$$

где  $r_{i,j}$  – истинное значение коэффициента корреляции изменения стоимости активов  $i, j$ ,  $\hat{r}_{i,j}$  – его оценка,  $n$  – количество инструментов в портфеле.

Тест был проведен для портфелей различной размерности, для наглядности ниже представлены результаты теста для портфеля, состоящего из трех активов, приращения которых являются винеровскими с заданной матрицей корреляций  $\Sigma$  и с заданными параметрами процессов приращений активов. Для простоты вычислений в эксперименте предполагается нулевое математическое ожидание для приращений активов, чего легко добиться путем центрирования данных в случае ненулевого наблюдаемого среднего значения. Эксперимент проводился на широком наборе параметров, включающем низкую, среднюю и высокую корреляцию между приращениями и различный уровень дисперсии приращений активов и рыночного шума. Критериями прохождения теста являются:

1. Снижение ошибки оценки параметров модели, рассчитанной по формуле (12), при увеличении числа симуляций.

2. Суммарная ошибка оценки матрицы корреляций, рассчитанная по формуле (13), менее 1%.

Для всего набора параметров были получены аналогичные результаты, подтверждающие сходи-

мость предлагаемого метода. В табл. 1 приведен пример случая высокоррелированных приращений активов и стандартных отклонений, близких к реально наблюдаемым на российском рынке акций. Результаты тестирования предлагаемого подхода для описанного случая представлены в табл. 2.

Таблица 1

Входные параметры теста			
Параметр	Значение, %	Параметр	Значение
$\sigma_1$	15	$\sigma_2$	30%
$\sigma_3$	40	$\sigma_\varepsilon$	10%
$\rho_{X_{1,2}}$	70	$\rho_{X_{1,3}}$	80%
$\rho_{X_{2,3}}$	60	$N$	10 000 000

\*В таблице указаны годовые значения.

Таблица 2

Оценки параметров модели и матрицы корреляций			
Параметр	Истинное значение	Оценка	Ошибка, %
$c_1$	0,889	0,895	0,6
$c_2$	0,222	0,229	3,2
$c_3$	0,125	0,122	2,2
$\rho_{1,2}$	68,42%	68,47%	0,1
$\rho_{1,3}$	78,36%	78,38%	0,0
$\rho_{2,3}$	59,59%	59,77%	0,3
$\Delta\Sigma$			0,4

Как видно из результатов теста, предлагаемый дает относительно точную оценку долгосрочной корреляции на базе краткосрочной, суммарная ошибка оценки матрицы корреляций менее 1%. На рис. 1 показано, что оценка параметров модели сходится к истинному значению при увеличении числа наблюдений.

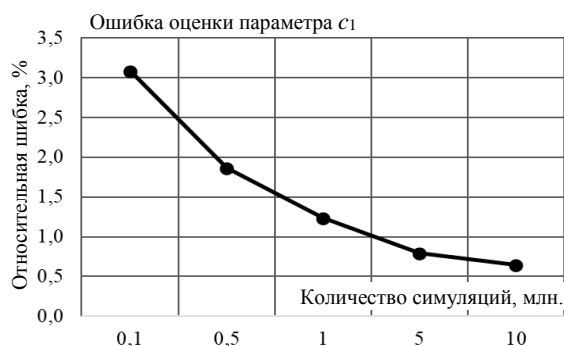


Рис. 1. Сходимость оценки параметра модели  $c_1$  к истинному значению при увеличении числа симуляций

На рис. 2 представлено сравнение истинной траектории для корреляции активов  $x_1, x_2$  в зависимости от длины временного интервала, а также его эмпирическая и модельная оценки для случая ограниченной выборки (5 лет дневных наблюдений). Наглядно видно, что для долгосрочной корреляции модельная оценка точнее, чем эмпирическая.

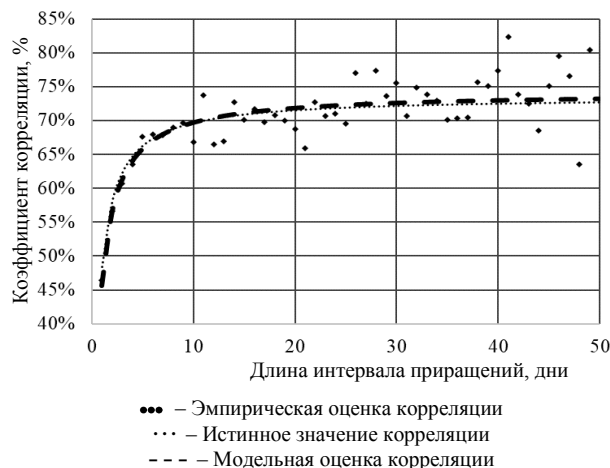


Рис. 2. Эмпирическая и модельная оценка коэффициента корреляции, а также истинное его значение для приращений активов  $x_1, x_2$

### Практические результаты

Для апробации предлагаемой модели на практике был рассмотрен процесс формирования оптимального портфеля «Марковица». Для теста использовались данные о ценах акций российских компаний, имеющих схожий уровень ликвидности:

1. ПАО «Селигдар» (SELG).
2. ПАО «Аптечная сеть 36,6» (АПТК).
3. ПАО «ММК» (MAGN).

Данные о ценах акций рассматриваемых компаний находятся в свободном доступе на сайте Финам [15]. Самой длинной историей обладают акции ПАО «Аптечная сеть 36,6», цены которых наблюдаются с 2003 г., цены акций ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» доступны с 2006 г., а ПАО «Селигдар» – лишь с 2012 г. Для оценки долгосрочной (месячной) корреляции по данным активам доступно лишь 96 наблюдений изменения цены на непересекающихся месячных интервалах. Несмотря на то, что доступные наблюдения включают в себя информацию об историческом периоде длиной в восемь лет и стрессовый период 2014–2015 гг., размер выборки, очевидно, является недостаточным, чтобы получить устойчивую оценку матрицы месячных корреляций по эмпирическим данным. Для увеличения числа наблюдений можно использовать данные о дневных, часовых или даже минутных изменениях в цене активов, что существенно расширит выборку и позволит получить устойчивую оценку матрицы корреляций.

Далее встает вопрос о выборе исторического окна, которое используется для оценки матрицы корреляций или параметров модели изменения активов в портфеле. Ключевым моментом при его выборе является сохранение баланса между релевантностью информации, содержащейся в данных, и размером доступной выборки. Даже если для актива доступна длинная история, использование слишком большого временного промежутка для оценки параметров модели может привести к включению в оценку значительного эффекта от изменчивости ди-

намики активов во времени. Чтобы этого избежать, зачастую на практике используют окно от трех до пяти лет. Например, европейские регуляторные органы [16] рекомендуют для оценки параметров моделей оценки рисков использовать историческое окно размером в три года.

Анализ, результаты которого представлены в этом разделе, основан на дневных изменениях в цене рассматриваемых активов за период с 2015 г. по март 2020 г. включительно. Доступные исторические данные были поделены на два интервала:

1. Интервал, используемый для оценки параметров и формирования портфеля (январь 2015 г. – июнь 2019 г.).
2. Интервал для тестирования (июнь 2019 г. – март 2020 г.).

Для рассматриваемых акций была получена оценка матрицы месячной ковариации с использованием различных матриц корреляции:

1. Эмпирическая оценка однодневной корреляции (портфель 1).
2. Эмпирическая оценка месячной корреляции на доступном размере выборки (портфель 2).
3. Модельная оценка месячной корреляции согласно предлагаемой модели (портфель 3).

Эмпирические матрицы корреляций дневных и месячных изменений цен рассматриваемых активов за период с января 2015 г. по июнь 2019 г. включительно представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Эмпирическая матрица корреляций дневных изменений цен акций за период с января 2015 г. по июнь 2019 г.**

	Аптеки, %	ММК, %	Селигдар, %
Аптеки	100,0	5,0	1,5
ММК	5,0	100,0	0,7
Селигдар	1,5	0,7	100,0

Таблица 4

**Эмпирическая матрица корреляций месячных изменений цен акций за период с января 2015 г. по июнь 2019 г.**

	Аптеки, %	ММК, %	Селигдар, %
Аптеки	100,0	9,9	0,8
ММК	9,9	100,0	5,1
Селигдар	0,8	5,1	100,0

Для оценки параметров модели  $c_i$  использовались эмпирические матрицы корреляций изменений стоимостей активов для временных интервалов от одного дня до недели. Недельный интервал изменения стоимостей был выбран в качестве базы для прогнозирования месячных корреляций из следующих соображений:

- 1) количество наблюдений недельных изменений стоимостей активов еще достаточно для получения относительно точной эмпирической оценки корреляций;
- 2) временные ряды недельных изменений стоимостей активов можно считать стационарными на

уровне значимости  $\alpha = 0,05^*$ , что позволяет использовать их для прогнозирования месячных корреляций;

3) количество временных интервалов меньшей длины достаточно для оценки параметров модели.

Оценки параметров модели для приращений акций ПАО «Аптечная сеть 36,6», ПАО «ММК» и ПАО «Селигдар» составили соответственно  $c_1 = 21511,6$ ,  $c_2 = 0,12$ ,  $c_3 = 25560,9$ .

На рис 3 изображено изменение эмпирической и модельной корреляции в зависимости от временного интервала, на котором рассчитываются приращения акций для пары Селигдар–ММК. Как видно из рис. 3, в отличие от эмпирической, модельная оценка дает сглаженную кривую зависимости корреляции от временного интервала, на котором рассчитаны приращения активов.

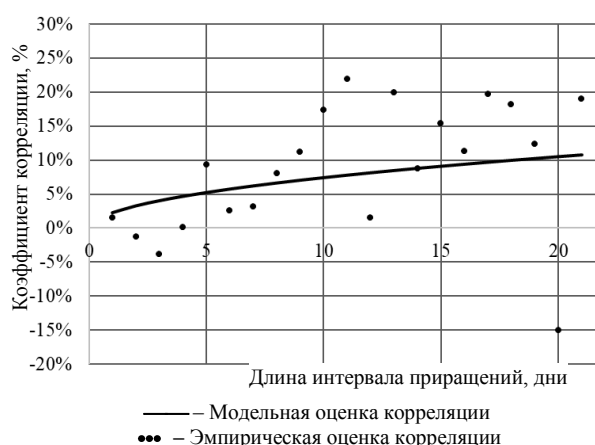


Рис. 3. Эмпирическая и модельная оценки коэффициента корреляции для приращений акций Башнефть и ММК в зависимости от временного интервала

В табл. 5 представлена модельная оценка месячной матрицы корреляций, рассчитанная с использованием эмпирической матрицы корреляций недельных изменений стоимостей активов и формулы (10).

Таблица 5

**Модельная оценка матрицы корреляций месячных изменений цен акций**

	Аптеки, %	ММК, %	Селигдар, %
Аптеки	100,0	10,5	-16,0
ММК	10,5	100,0	10,8
Селигдар	-16,0	10,8	100,0

Можно заметить, что корреляция между приращениями акций ПАО «Селигдар» и ПАО «Аптечная сеть 36,6», полученная при помощи модели, составила -16%, в то время как эмпирическая оценка месячной корреляции для той же пары активов, произведенная на 54 точках и представленная в табл. 4, составила 0,8%. Причиной этому может являться то, что эмпирическая оценка произведена на малом количестве наблюдений и как следствие является ста-

\*Для проверки стационарности были использованы три статистических теста: расширенный тест Дики–Фуллера (ADF), тест Квятковского–Филлипса–Шмидта–Шина (KPSS), тест Филлипса–Перрона (PP) [16].

тистически неустойчивой. Более того, для данных акций наблюдается сильный разброс эмпирически наблюдаемого коэффициента корреляции в зависимости от временного интервала, а, как отмечалось ранее, модельная оценка является более сглаженной.

Используя полученные матрицы корреляций, для выбранных активов были составлены три оптимальных портфеля «Марковица» с минимальным возможным риском и уровнем доходности не ниже заданного (5% годовых) на конец июня 2019 г.

Как видно из табл. 6, наименьший риск портфеля при заданной доходности достигается при использовании матрицы корреляций, полученной при помощи предлагаемой модели (портфель 3). Предполагая отсутствие процедуры реформирования портфеля, было проведено сравнение основных характеристик, которые демонстрировали портфели на протяжении времени на интервале для тестирования.

Таблица 6  
Сравнение оптимальных портфелей, полученных при использовании разных матриц корреляций

Характеристики	Портфель 1	Портфель 2	Портфель 3
Стоимость, руб., включая:	10 000	10 000	10 000
АРТК	8 506	8 662	8 594
MAGN	1 207	1 012	870
SELG	287	326	537
Доходность, %	5,8	5,0	5,1
Риск, %	7,6	6,4	1,6

На рис. 4 представлена динамика стоимости полученных портфелей за период июль 2019 – март 2020 г., а в табл. 7 – характеристики, демонстрируемые портфелями в течение тестового интервала. Из рис. 4 видно, что портфели 1 и 2 демонстрируют практически идентичную динамику стоимости во времени, в то время как стоимость портфеля 3, построенного при помощи модельной оценки матрицы корреляций, увеличивается при увеличении длительности периода держания портфеля в условиях отсутствия процедуры его реформирования. Такое поведение портфеля крайне благоприятно для долгосрочных инвесторов.

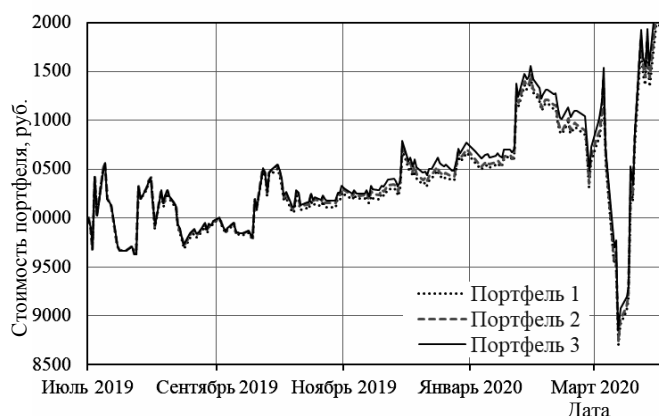


Рис. 4. Динамика стоимости рассматриваемых портфелей, июль 2019 г. – март 2020 г.

Как видно из табл. 7, самую высокую доходность в 22% за 10 месяцев показал портфель 3, обогнав при практически равном риске портфель 2 на 2%.

Таблица 7  
Сравнение основных характеристик рассматриваемых портфелей, июль 2019 г. – март 2020 г.

Характеристики	Портфель 1	Портфель 2	Портфель 3
Общая доходность портфеля, %	19,5	20,8	22,4
Общее изменение стоимости портфеля, руб.	1951,3	2047,7	2233,5
Стандартное отклонение в изменении стоимости портфеля, руб.	232,4	236,7	235,7
Среднее изменение стоимости портфеля, руб.	10,3	10,8	11,8

### Заключение

Представленный в данной работе подход к оценке корреляции приращений активов в портфеле позволяет получить оценку долгосрочной корреляции на базе краткосрочной, в том числе в условиях ограниченного количества доступных наблюдений. Данное преимущество подхода дает возможность оценить долгосрочную корреляцию для низколиквидных финансовых инструментов, а также для инструментов, не обладающих длинной историей в силу недавнего присутствия на рынке.

Так как модель использует аналитический подход к моделированию матрицы корреляции (за исключением численных методов, используемых для оценки параметров модели), то полученная матрица корреляций сохраняет свои основные свойства положительной определенности и симметричности по построению. Более того, предлагаемый подход позволяет сгладить кривую зависимости корреляции от временного интервала, на котором рассчитываются приращения активов портфеля, что позволяет упростить дальнейшее использование такой оценки в различных моделях изменения стоимостей базовых активов.

Проведенный численный эксперимент с использованием синтетических данных, полученных посредством имитационного моделирования, показал, что с ростом числа наблюдений оценки параметров модели сходятся к истинным значениям, что говорит об адекватности предлагаемого метода оценки параметров модели.

Апробация модели на реальных данных позволила получить кривую зависимости корреляции изменений стоимостей от временного интервала для акций трех компаний ПАО «Селигдар» (SELG), ПАО «Аптечная сеть 36,6» (АРТК), ПАО «ММК» (MAGN), а также была получена оценка месячной матрицы корреляций. В рамках тестирования на реальных данных были сформированы три оптимальных портфеля согласно теории «Марковица» с использованием матриц корреляций, полученных тре-

мя возможными способами, в том числе при помощи предлагаемой модели. На этапе формирования портфеля, построенный при помощи модельной матрицы корреляций, показал наименьший возможный уровень риска при заданном уровне доходности (1,6% против 7,6 и 6,4% для альтернативных портфелей). При наблюдении за динамикой стоимости портфелей в предположении отсутствия процедуры его переформирования портфель, построенный при помощи модельной матрицы корреляций, показал доходность на 2–4% выше при том же уровне риска.

#### Литература

1. Бронштейн Е.М. О формировании портфелей российских ценных бумаг на основе комбинированных квантильных мер риска / Е.М. Бронштейн, Е.В. Тулупова // Аудит и финансовый анализ. – 2014. – № 3. – С. 115–120.
2. Бронштейн Е.М. Управление портфелем ценных бумаг на основе комплексных квантильных мер риска / Е.М. Бронштейн, М.М. Качкаева, Е.В. Тулупова // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 1. – С. 178–183.
3. Пимонов А.Г. Оптимизация состава и структуры инвестиционного портфеля на основе энтропийной меры риска и статистики Херста / А.Г. Пимонов, Р.С. Арнаутов // Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ–2018): сб. науч. трудов XXI Рос. науч. конф. – М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2018. – 307 с.
4. Rachev S.T. Fat-Tailed and Skewed Asset Return Distributions: Implications for Risk Management: Implications for Risk Management, Portfolio Selection, and Option Pricing / S.T. Rachev, C. Menn, F.J. Fabozzi. – Hoboken: Wiley, 2005. – 369 p.
5. Abad P. Evaluating the performance of the skewed distributions to forecast Value at Risk in the Global Financial Crisis / P. Abad, S. Benito, C. López // Journal of Risk. – 2016. – Vol. 19, No. 5. – P. 1–18.
6. Düllmann K. Estimating asset correlations from stock prices or default rates – which method is superior? / K. Düllmann, J. Küll, M. Kunisch // Journal of Economic Dynamics and Control. – 2010. – Vol. 34, No. 11. – P. 2341–2357.
7. Ledoit O. The power of (non-)linear shrinking: A review and guide to covariance matrix estimation / O. Ledoit, M. Wolf // Working Paper no. 323, Department of Economics, University of Zurich. – Zurich: University of Zurich, 2019. – 41 p.
8. Shevlyakov G. Robust Estimation of the Correlation Coefficient: An Attempt of Survey / G. Shevlyakov, P. Smirnov // Austrian journal of statistics. – 2011. – Vol. 40, No. 1&2. – P. 147–156.
9. Assessment of long-range correlation in time series: How to avoid pitfalls / J. Gao, J. Hu, W.W. Tung, Y. Cao, N. Sarshar, V.P. Roychowdhury // Physical review E. – 2006. – Vol. 73, No. 1, Pt. 2. – P. 16–117.
10. Markowitz H. Portfolio Selection // The Journal of Finance. – 1952. – Vol. 7, No. 1. – P. 77–91.
11. Epps T.W. Comovements in Stock Prices in the Very Short Run // Journal of the American Statistical Association. – 1979. – Vol. 74, No. 366a. – P. 291–298.
12. Bun J. Cleaning correlation matrices / J. Bun, J.-P. Bouchaud, M. Potters // Risk. – 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cfm.fr/assets/ResearchPapers/2016-Cleaning-Correlation-Matrices.pdf>, свободный (дата обращения: 16.03.2020).
13. Chin C.J. Correlations Have Personality, Too: An Analysis of Correlations between Assets [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.naaim.org/wp-content/uploads/2013/10/00L\\_Correlations\\_have\\_Personality\\_carlton\\_chin.pdf](http://www.naaim.org/wp-content/uploads/2013/10/00L_Correlations_have_Personality_carlton_chin.pdf), свободный (дата обращения: 16.03.2020).
14. Basel Committee on Banking Supervision. International Convergence of Capital Measurement and Capital Standards. – Basel: Bank for International Settlements, 2004. – 239 p.
15. Официальный сайт Финам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.finam.ru/>, свободный (дата обращения: 16.03.2020).
16. Arltová M. Selection of Unit Root Test on the Basis of Length of the Time Series and Value of AR(1) Parameter / M. Arltová, D. Fedorová // Statistika. – 2016. – Vol. 96, No. 3. – P. 47–64.

#### Барышева Александра Евгеньевна

Аспирант Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 2, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 42-39-34  
Эл. почта: alexandramelnikk@mail.ru

#### Марков Александр Сергеевич

Канд. физ.-мат. наук, рук. направления валидации математических моделей ООО «ЭКО-ТОМСК» Ленина пр-т, д. 60, стр. 1, оф. 305, г. Томск, Россия, 634034  
Тел.: +7 (382-2) 90-06-01  
Эл. почта: alexander.markov@econophysica.com

#### Мицель Артур Александрович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), профессор НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 51-05-30  
Эл. почта: maa@asu.tusur.ru

Barysheva A.E., Markov A.S., Mitcel A.A.

#### New approach to the assessment of portfolio long-term correlation

A new approach to the portfolio long-term correlation assessment is proposed in this paper which allows obtaining the long-term correlation estimate based on a short-term correlation. The advantage of proposed model is that it can be used for non-liquid financial instruments and instruments which are new to the market, as it enables estimating the model parameters based on a restricted number of asset price observations. The numerical experiment described in this paper shows the model parameters converge to the true values with increasing number of the observations. The proposed model was applied to the real data of three Russian companies to obtain the curve that describes the assets correlation dependency on a holding period. Also, for the portfolio considered, the correlation matrix of one-month returns is obtained.

**Keywords:** long-term correlation, portfolio management, correlation matrix modeling.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-73-80



## References

1. Bronstein E.M., Tulupova E.V. [On the forming of portfolios of the Russian securities based on the complex quantile risk measures]. *Audit and financial analysis*, 2014, no. 3, pp. 115–120 (in Russ.).
2. Bronshtein E.M., Kachkaeva M.M., Tulupova E.V. [Control of investment portfolio based on complex quantile risk measures]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, no. 1, pp. 178–183 (in Russ.).
3. Pimonov A.G., Arnautov R.S., *Optimizaciya sostava i struktury investicionnogo portfelya na osnove entropijnoj mery riska i statistiki Hersta* [Optimization of the composition and structure of the investment portfolio based on the entropy risk indicator and Hurst statistics]. *Inzhiniring predpriyatij i upravlenie znaniyami (IP&UZ–2018): sbornik nauchnyh trudov XXI Rossijskoj nauchnoj konferencii*. [Enterprise Engineering and Knowledge Management (EE & KM–2018). Proc. of the XXI Russian Scientific Conference]. Moscow, Plekhanov Russian University of Economics Publ., 2018. pp. 294–299 (in Russ.).
4. Rachev S.T., Menn C., Fabozzi F.J. *Fat-Tailed and Skewed Asset Return Distributions: Implications for Risk Management, Portfolio Selection, and Option Pricing*. Hoboken, Wiley Publ., 2005. 369 p.
5. Abad P., Benito S., López C., Evaluating the performance of the skewed distributions to forecast Value at Risk in the Global Financial Crisis. *Journal of Risk*, 2016, vol. 18, no. 5, pp. 1–18.
6. Düllmann K., Küll J., Kunisch M. Estimating asset correlations from stock prices or default rates – which method is superior? *Journal of Economic Dynamics and Control*. 2010, vol. 34, no. 11, pp. 2341–2357.
7. Ledoit O., Wolf M., *The power of (non-)linear shrinking: A review and guide to covariance matrix estimation*. Working Paper No. 323, Department of Economics, University of Zurich. Zurich, University of Zurich Publ., 2019. 41p.
8. Shevlyakov G., Smirnov P.O., Robust Estimation of the Correlation Coefficient: An Attempt of Survey. *Austrian journal of statistics*. 2011, vol. 40, no. 1&2, pp. 147–156.
9. Gao J., Hu J., Tung W.W., Cao Y., Sarshar N., Roychowdhury V.P. Assessment of long-range correlation in time series: How to avoid pitfalls. *Physical review E.*, 2006, vol. 73, no. 1, pt. 2., pp. 16–117.
10. Markowitz H. Portfolio Selection. *The Journal of Finance*. 1952, vol. 7, no. 1, pp. 77–91.
11. Epps T.W. Comovements in Stock Prices in the Very Short Run. *Journal of the American Statistical Association*, 1979, vol. 74, no. 366a, pp. 291–298.
12. Bun J., Bouchaud J.-P., Potters M. Cleaning correlation matrices. *Risk*, 2016. Available at: <https://www.cfm.fr/assets/ResearchPapers/2016-Cleaning-Correlation-Matrices.pdf> (Accessed: March 16, 2020).
13. Chin C.J. Correlations Have Personality, Too: An Analysis of Correlations between Assets. Available at: [http://www.naaim.org/wp-content/uploads/2013/10/00L\\_Correlations\\_have\\_Personality\\_carlton\\_chin.pdf](http://www.naaim.org/wp-content/uploads/2013/10/00L_Correlations_have_Personality_carlton_chin.pdf) (Accessed: March 16, 2020).
14. Basel Committee on Banking Supervision. *International Convergence of Capital Measurement and Capital Standards*. Basel, Bank for International Settlements Publ., 2004. 239 p.
15. Official «Finam» website. Available at: <https://www.finam.ru/> (Accessed: March 16, 2020).
16. Arltová M., Fedorová M. Selection of Unit Root Test on the Basis of Length of the Time Series and Value of AR (1) Parameter. *Statistika*, 2016, vol. 96, no. 3, pp. 47–64.

**Alexandra E. Barysheva**

Postgraduate student, School of Nuclear Science and Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University 2, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 42-39-34  
Email: alexandramelnikk@mail.ru

**Alexander S. Markov**

Candidate of Physics and Mathematics,  
Lead of Model Validation Department in «Econophysics» Ltd. 60, Lenin pr. building 1, off. 305, Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7 (382-2) 90-06-01  
Email: alexander.markov@econophysics.com

**Artur A. Mitcel**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Automated Control Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 51-05-30  
Email: maa@asu.tusur.ru

УДК 004.42

А.В. Городович, И.А. Кречетов, В.В. Кручинин, М.Ю. Перминова

## Инструментальная система анализа и оценивания учебного контента

Рассматриваются вопросы построения инструментальной системы анализа и оценивания учебного контента вуза. Выявлены требования к такой системе, предложены алгоритмы анализа. Определены критерии оценивания контента двух типов: автоматические, значения которых устанавливаются на основе алгоритмов анализа, и получаемые в ходе экспертного опроса. Все критерии содержатся в базе знаний. Предложена оригинальная структура инструментальной системы, включающая базу знаний, базу электронных образовательных ресурсов, модули построения процедуры оценки, анализа, обработки, оценивания и планирования модернизации электронного учебного ресурса.

**Ключевые слова:** инструментальная система, электронный образовательный ресурс, критерий, база знаний, база данных, структура, процедура оценивания.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-81-88

Технологии электронного обучения становятся важнейшей составляющей организации учебного процесса. В настоящее время наблюдается взрывной рост числа разнообразных онлайн-курсов и электронных образовательных ресурсов (ЭОР). Накопленный таким образом большой объем электронных учебных ресурсов потребует оценки и, соответственно, модернизации.

В Томском университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) имеется более чем 20-летний опыт организации и применения дистанционных технологий обучения [1]. Так, например, на факультете дистанционного обучения (ФДО) ТУСУР в настоящее время имеется свыше 2 400 различных учебно-методических материалов (учебных и учебно-методических пособий, курсов лекций, методических указаний и т.п.), представленных в электронной форме [2], общее число ЭОР (с учетом электронных курсов и тестовых заданий) превышает 5 000. Анализ такого объема ЭОР показывает огромное их разнообразие, что существенно затрудняет построение единого инструмента оценивания качества отдельных единиц. С другой стороны, наличие большого числа методов оценивания качества затрудняет методику выбора средств оценивания. Кроме того, ускоренное изменение требований к электронному учебно-методическому комплексу дисциплины (ЭУМКД) с одновременным развитием информационных технологий привело к ситуации качественного отставания практикуемых методов оценивания ЭУМКД [3].

Одним из возможных решений данной проблемы является создание инструментальной системы построения процедур оценки качества ЭУМКД. Основной идеей такой системы является построение процедуры оценивания на основе базы знаний критериев оценивания, которая может быть расширена за счет ввода новых или модификации имеющихся критериев оценивания.

Рассмотрим основные требования, предъявляемые к инструментальной системе построения про-

цедуры оценивания ЭУМКД, основанные на проведении системного анализа предметной области [4].

Система должна:

- формировать и использовать базу данных ЭУМКД;
- иметь базу знаний по критериям с возможностью включать и модернизировать критерии оценки;
- иметь возможность формировать процедуру вычисления матрицы оценок путем включения или удаления критериев оценки из базы знаний;
- манипулировать матрицей оценок элементов ЭУМКД;
- формировать вектор обобщенных оценок ЭУМКД;
- манипулировать матрицей предпочтений критериев и формировать вектор весовых коэффициентов (коэффициент значимости критерия);
- вычислять итоговую оценку конкретного ЭУМКД и множества ЭУМКД;
- представлять рейтинг, вектор обобщенных оценок, вектор коэффициентов предпочтений и матрицу оценок в удобочитаемой форме;
- формировать интерактивные формы для работы экспертов по оценке элементов ЭУМКД;
- формировать отчеты по работе экспертов и своевременно сообщать о проблемах лицу, осуществляющему мониторинг работы системы;
- формировать и использовать базу данных по экспертам ЭУМКД, а также историю проведенных ими экспертиз;
- формировать базу данных истории рейтинга ЭУМКД.

Рассмотрим систему критериев, построенную на основе анализа множества ЭУМКД ФДО ТУСУР. Были выявлены следующие базовые элементы оценивания [5]:

- учебный текст;
- креолизованный учебный текст;
- иллюстрация;
- видеофайл;
- аудиофайл;

- тестовые задания;
- организация навигации, поиска и справочной информации.

Учебный текст является основой представления учебной информации, поэтому его качество является важной характеристикой (показателем). Существует огромное число параметров текста, используемых при его оценке. В ходе исследования ЭУМКД ФДО ТУСУР были выделены следующие показатели качества текста: информационная насыщенность; абстрактность; удобочитаемость; водность; плотность ключевых слов [6].

Часто авторы пособий для улучшения восприятия и понимания текста используют разнообразные невербальные средства, такие как изменение параметров шрифта, использование различного цвета фона, подчеркивание, пиктограммы, выделение текста рамками и др. Такое представление учебного текста называется «креолизованный текст» [7]. Для оценки качества креолизованного текста предложена следующая модель [7]:

1. Определяются классы креолизации текста:

- Выделение текста цветом фона, начертанием (курсив, жирность) или другим шрифтом.
- Выделение текста в виде фигуры, например текст в рамке.
- Использование пиктограммы для некоторого указания.
- Использование гиперссылки (на ресурс).

2. Для каждой единицы текста (абзац, параграф, раздел) выявляется общее число слов (словосочетаний) заданного класса. В результате получится матрица  $n \times m$ :

	Класс=1	Класс=2	Класс = $m$
Блок № 1	$k_{1,1}$	$k_{1,2}$	$k_{1,m}$
Блок № 2	$k_{2,1}$	$k_{2,2}$	$k_{2,m}$
...	...	...	...
Блок № $n$	$K_{n,1}$	$k_{i,2}$	$K_{n,m}$

3. Вычисляется среднее по каждому столбцу  $V_1, V_2, \dots, V_j$ .

4. Вычисляется среднеквадратическое отклонение, которое показывает равномерность распределения креолизованного текста:

$$S_j = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (k_{ij} - V_j)^2,$$

где  $n$  – число единиц (блоков) текста.

5. Вычисляется коэффициент степени креолизации  $j$ -го класса:

$$\alpha_j = \frac{C_j}{V} \times 100,$$

где  $C_j$  – объем креолизованного текста класса  $j$ ,  $V$  – общий объем текста.

6. Вычисляется суммарный коэффициент степени креолизации учебного текста:

$$\alpha = \sum_{i=0}^m w_i \alpha_i,$$

где  $w_i$  – коэффициент значимости данного класса креолизации,  $m$  – число классов.

Рассмотрим выявление критериев оценки для иллюстраций. В учебной литературе иллюстрации разделяются на три вида: раскрывающие содержание, т.е. способные заменить основной текст; равнозначные тексту и обслуживающие текст. Первый вид иллюстраций используется в учебных изданиях, когда визуальная информация более содержательна, чем вербальная. Вторым видом иллюстраций предполагается, что текст и иллюстрации будут взаимно дополнять друг друга и в то же время каждый нести отдельную информационную нагрузку. Иллюстрации третьего вида – издательские иллюстрации, призванные создать положительный эмоциональный фон у читателя. Создание иллюстраций носит сугубо творческий характер и формализации практически не поддается, поэтому качество иллюстраций можно оценить на основе экспертной процедуры [8]. Оценку качества иллюстраций можно произвести и с технической стороны, в особенности это касается качества изображений.

Существуют исследования, посвященные качеству изображений в растровых графических форматах. Например, в работе [9] предлагаются следующие критерии и методы укрупненной оценки качества изображений для растровых графических форматов: оценка яркости изображения, оценка контрастности изображения, оценка преобладающего тона и тоновой насыщенности, оценка резкости изображения.

Другими важными критериями являются параметры соотношения иллюстраций и текста. Здесь можно опираться на исследования, позволяющие формализовать процесс получения оценки соотношения иллюстраций в учебном тексте. Так, в работе И.В. Кротовой предлагаются следующие параметры [10–11]:

- доля наглядности в тексте;
- средний объем одной иллюстрации;
- среднее число иллюстраций, приходящихся на одну страницу;
- максимальный объем иллюстраций;
- минимальный объем иллюстраций;
- разница между максимальным и минимальным объемом иллюстраций;
- цветность иллюстраций;
- доля разных видов наглядности в тексте.

В книгоиздании существуют рекомендации, определяющие отношение площади иллюстрации к площади набора. Для учебных изданий этот процент имеет границу 10–40%, например, для формата издания 60×90 1/16 это будет выглядеть примерно так: 5–12 иллюстраций на 1 уч.-изд. лист [8]. Однако многие издательства вводят свои соотношения площади текста и иллюстраций, и эти цифры также весьма условны. Фактическое количество иллюстраций уточняется в зависимости от читательского назначения издания и определяется индивидуально [8].

Предлагается ввести следующие критерии:

1. Доля наглядности в тексте, вычисляемая по формуле

$$D_H = \frac{V_H}{V_0} \times 100\%,$$

где  $V_H$  – объем иллюстраций в тексте,  $V_0$  – общий объем текста.

2. Распределение иллюстраций в тексте.

3. Средняя оценка качества изображений для графических форматов.

Еще одним базовым элементом оценивания ЭУМКД является видеофайл. На ФДО ТУСУР широко используются видеолекции. Основные критерии оценки учебного видео:

1. Оценка технической составляющей видео (качество записи, формат записи и др.).

2. Оценка дидактики видео (тип, длительность и сложность видео, наличие сценария, использование интерактивного текста).

Подобные критерии можно предложить и для аудиофайлов.

Важным элементом ЭУМКД являются оценочные материалы, которые представляют собой банк тестовых заданий для промежуточного и итогового контроля знаний по дисциплине. Сюда же можно отнести и тестовые задания для самопроверки (у студентов имеется возможность посмотреть правильные ответы).

Тестовые задания для самопроверки могут оцениваться по следующим критериям:

1. Наличие классификации заданий по сложности (имеется шкала).

2. Наличие ответов или решений заданий (и/или ссылок на решения).

3. Оценка текста заданий (по критериям оценки учебного и креолизованного текста).

Для оценки банка тестовых заданий для промежуточного и итогового контроля знаний можно предложить следующие критерии:

1. Объем банка (количество заданий).

2. Наличие системы оценивания (сколько и каких заданий необходимо выполнить для получения заданной оценки).

3. Возможность генерации исходных данных для заданий.

4. Использование технологий тестирования (простое, адаптивное и др.).

5. Наличие кодификатора (позволяет установить связь между методическим обеспечением, по которому составлено тестовое задание, и самим заданием).

6. Степень распределения заданий по темам и разделам курса.

7. Анализ текста заданий (по критериям оценки учебного и креолизованного текста).

Для оценки организации поиска и навигации в ЭУМКД необходимо иметь некоторый аппарат, который основан на применении разнообразных указателей. Перечислим основные из них:

- глоссарий;
- предметный указатель;
- именной указатель;
- географический указатель;
- хронологический указатель;
- список иллюстраций;
- список таблиц;
- список сокращений;
- среда ссылок на разделы, страницы, таблицы, рисунки (иллюстрации), формулы, литературу.

Здесь критериями могут выступать наличие, полнота и объем соответствующего указателя.

Оценка соответствия ЭУМКД нормативно-правовому обеспечению организации учебного процесса производится на основе экспертного опроса и соответствует инструкциям стандартной экспертизы учебно-методического обеспечения. Для каждого элемента ЭУМКД формируется анкета для опроса эксперта.

Пример критериев для учебного пособия:

• Степень соответствия объема пособия общей трудоемкости дисциплины.

• Степень соответствия содержания пособия целям и задачам дисциплины.

• Степень соответствия содержания пособия компетенциям.

• Степень соответствия содержания пособия формируемым знаниям, умениям и навыкам и обеспечения их преемственности с получаемыми при изучении предшествующих и последующих дисциплин.

• Степень соответствия названия глав пособия названиям разделов дисциплины.

• Степень соответствия объема глав пособия часам, отведенным на их изучение.

Таким образом, в базе знаний содержатся два типа критериев: автоматический, значение которого определяется на основе некоторого алгоритма вычисления, и полученный на основе опроса экспертов.

Структура инструментальной системы представлена на рис. 1. Она состоит из следующих основных модулей и подсистем.

*Модуль управления базой ЭУМКД* обеспечивает ведение базы ЭУМКД и осуществляет входной контроль:

- 1) проверка на соответствие форматов файлов;
- 2) предварительный анализ ЭУМКД;
- 3) проверка на соответствие стандарта ЭУМКД;
- 4) ввод новых ЭУМКД;
- 5) замена устаревших ЭУМКД;
- 6) выполнение статистических запросов и формирование сводных таблиц по кафедрам, специальностям и др.

*База ЭУМКД* содержит:

- 1) ЭУМКД, оформленные в HTML-формате;
- 2) Ф.И.О. и должности авторов;
- 3) название и коды дисциплины;
- 4) ссылку на учебный план;
- 5) название кафедры.

Модуль управления базой знаний обеспечивает формирование и редактирование базы знаний по критериям оценивания. В основу базы знаний оценивания положена онтологическая модель всех элементов и критериев оценивания [12] Основными элементами этой базы являются:

1. Критерий.
2. Шкала.

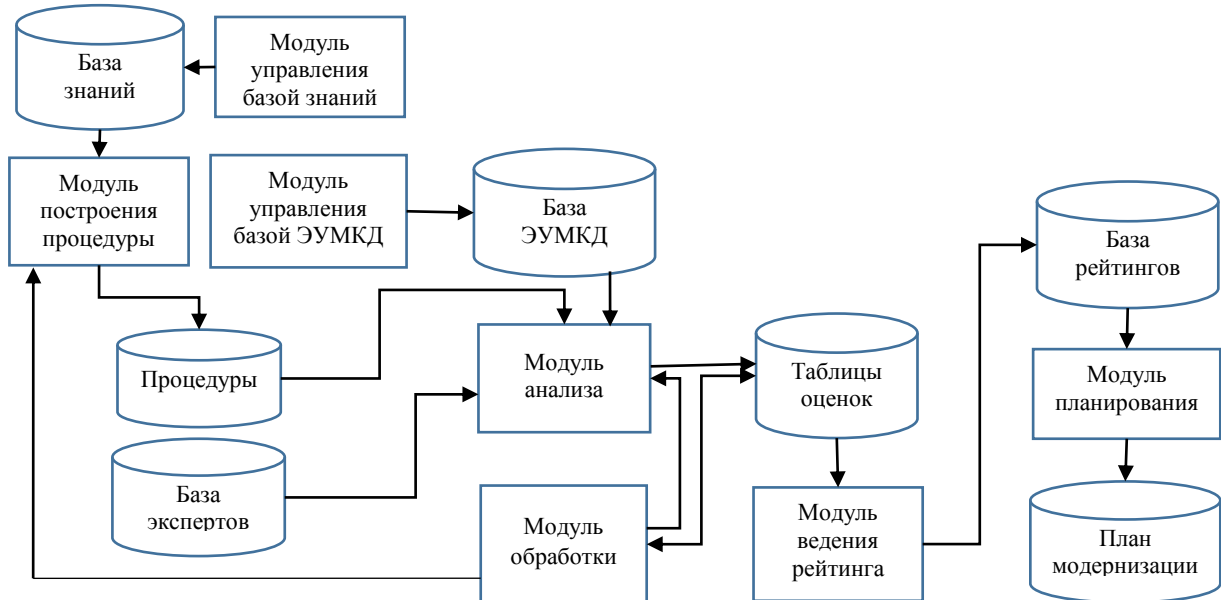


Рис. 1. Структура инструментальной системы построения процедуры оценивания и ее проведения

В базу знаний включено 32 автоматических критерия.

База экспертов хранит следующие сведения об эксперте:

- персональные данные;
- электронную почту;
- элементы ЭУМКД, для которых они могут проводить экспертизу;
- опыт проведения экспертиз.

Модуль построения процедуры оценивания предназначен для формирования процедуры оценивания. Процедура оценивания содержит множество автоматических критериев и опросных анкет для экспертов. Процесс построения процедуры начинается с ввода имени процедуры и выбора автоматических критериев оценивания (см. экранную форму рис. 2). Далее производится ввод опросных анкет для опроса экспертов. Для анкетирования экспертов используется инструмент сервиса Google Forms. Выбор данного инструмента объясняется следующим [13, 14]:

- 1) простой и интуитивно ясный интерфейс;
- 2) возможность создания разного вида вопросов, а также перемешивания их между собой;
- 3) автоматический анализ ответов;
- 4) формирование отчетов в виде таблиц;
- 5) возможность отправить опрос по почте или опубликовать в социальных сетях;
- 6) интеграция с другими сервисами Google;

3. Элемент оценивания ЭУМКД (текст, иллюстрация, видео, вопрос и т.д.).

4. Алгоритм получения элемента ЭУМКД.

5. Процедура выбора эксперта.

6. Алгоритм оценивания или процедура проведения экспертизы.

7. Дата включения критерия в базу.

7) возможность интеграции с программными продуктами сторонних разработчиков через API;

8) успешное использование данного инструмента в схожих проектах [15].

После того как была построена процедура оценивания (см. экранную форму рис. 3), необходимо запустить модуль анализа. Этот модуль требует ввода множества ЭУМКД из базы данных и запускает соответствующие программы вычисления автоматических критериев для каждого выявленного элемента ЭУМКД. В тех случаях, когда требуется запустить анкету опроса экспертов, формируются запросы проведения анкетирования. Результаты вычислений и опросов экспертов заносятся в сводную таблицу.

Оценки ЭУМКД

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	...	$K_n$
$\mathcal{E}_1$	$Z_{11}$	$Z_{12}$	$Z_{13}$		$Z_{1k}$
$\mathcal{E}_2$	$Z_{21}$	$Z_{22}$	$Z_{23}$		$Z_{2k}$
$\mathcal{E}_3$	$Z_{31}$	$Z_{32}$	$Z_{33}$		$Z_{3k}$
...					
$\mathcal{E}_k$	$Z_{k1}$	$Z_{k2}$	$Z_{k3}$		$Z_{nk}$

Здесь  $K_i$  – множество критериев,  $\mathcal{E}_j$  – множество элементов ЭУМКД,  $Z_{ij}$  – значение  $i$ -го критерия для  $j$ -го элемента. Элемент ЭУМКД = < идентификатор, тип, контент, локация (размещение) >.

Результат работы модуля анализа ЭУМКД (экранный форма оценок ЭУМКД) приведен на рис. 4.

Модуль обработки результатов анализа обеспечивает вычисление обобщённых показателей оценок ЭУМКД. Вычисляются среднее значение

$$V_i = \frac{1}{n} \sum_{j \in X} Z_{i,j}$$

и среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j \in X} (Z_{i,j} - V_i)^2}$$

Далее производится нормализация на основе формулы

$$Y = \frac{Y_T}{Y_{\max}}$$

Затем определяются коэффициенты значимости критериев на основе процедуры (метода) определе-

ния важности критериев (методом предпочтения, последовательного сравнения, расстановки приоритетов).

Для вычисления коэффициентов значимости критериев создается группа экспертов, которые, используя анкеты, формируют данные или оценки, используемые для дальнейшей обработки. Вычисление рейтинга ЭУМКД определяется на основе формулы

$$R_{\text{ЭУМКД}} = \frac{1}{n} \sum_{j \in \text{ord}(V)} \alpha_j Y_j,$$

где  $n$  – длина вектора обобщенных значений оценок;  $\alpha_j$  – коэффициент значимости для  $j$ -го критерия;  $Y_j$  – нормализованные значения критерия.

Название процедуры

Procedure

Автоматические показатели      Экспертные показатели

№	<input checked="" type="checkbox"/>	Название показателя	Описание показателя
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Абстрактность	+ Доля слов в тексте, обозначающих абстрактные смысловые объекты, то есть такие, которые недоступны непосредственному чувственному восприятию.
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Среднее число иллюстраций на странице	+ Отношение числа изображений на странице к числу страниц.
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Выделение фоновым цветом	+ Выделение единицы текста путем добавление цвета заднего фона.
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Равномерность распределения выделения фоновым цветом	+ Среднеквадратичное отклонение от среднего количества единиц текста, выделенных цветом фона.

Рис. 2. Выбор автоматических критериев из базы знаний для процедуры

Система анализа электронных курсов ☰

#	Название процедуры	Название формы	Название таблицы ответов	Изменить процедуру	Удалить процедуру
1	Procedure1	FProcedure1	SProcedure1	⚙️	🗑️
2	Procedure2	FProcedure2	SProcedure2	⚙️	🗑️
3	Procedure3	FProcedure3	SProcedure3	⚙️	🗑️
4	123a	123a_f	123a_ans	⚙️	🗑️
5	pmy	pmy	pmy	⚙️	🗑️

+ Добавить процедуру

Рис. 3. Выбор процедуры оценивания

	A	B	C	D	E	F	G
1			Оценка качества текста				
2	Отметка времени	Идентификатор курса	Абстрактность	Информационная насыщенность	Плотность ключевых слов	Удобочитаемость	Водность
3	25.06.2020 14:11:20	4	24,97	13,51	31,53	6,84	3,58
4	25.06.2020 16:40:25	34	25,7	5,76	43,81	8,83	1,4
5	25.06.2020 16:16:05	40	26,83	15,32	37,52	6,49	1,59
6	25.06.2020 16:58:18	46	25,64	3,87	33,14	8,16	2,12
7	25.06.2020 16:42:31	52	22,52	15,48	33,21	6,15	3,11
8	25.06.2020 16:08:44	74	22,02	11,75	33,5	5,42	6,18
9	25.06.2020 16:02:52	75	28,28	2,3	40,1	7,33	1,32
10	25.06.2020 14:49:29	77	25,72	5,78	24,58	7,78	3,73
11	25.06.2020 14:10:19	89	27,42	16,36	40,63	9,52	2,35
12	25.06.2020 15:59:27	95	21,44	27,41	25,26	5,4	5,08
13	25.06.2020 15:56:40	97	20,38	47,95	19,85	5,02	6
14	25.06.2020 14:55:24	106	25,18	14,69	44,01	8,58	1,66
15	25.06.2020 16:34:28	140	26,7	5,64	38,74	8,17	1,89
16	25.06.2020 16:24:04	153	22,22	16,25	26,72	4,95	4,72

Рис. 4. Результат работы модуля анализа

Возможность стандартного представления результатов анализа в виде Excel-таблицы позволяет подключать сторонние системы вычисления показателей качества, такие как, например, система СВБР [16], 1000Minds, D-Sight CDM [17]. Это свойство инструментальной системы позволит строить разнообразные системы оценивания ЭУМКД.

Модуль ведения рейтинга обеспечивает манипуляцию и получение отчетов для директивных органов, а также ведение базы данных оценок различных классов ЭУМКД.

Модуль планирования обеспечивает формирование плана мероприятий по модернизации ЭУМКД в соответствии с полученными оценками множества ЭУМКД с алгоритмами, представленными в [18].

Инструментальная система представляет собой веб-сервис, реализованный по объектно-ориентированной методологии программирования на языке Python. Клиентская часть реализована с использованием фреймворка Bootstrap, серверная часть – с использованием фреймворка Django. Для работы с компонентами Google Docs используются программные интерфейсы Google Forms и Google Spreadsheets. Контент для автоматического анализа берётся из электронного курса, в котором опубликованы все компоненты соответствующего ЭУМКД. Для оптимизации скорости работы сервиса файлы всех электронных курсов предварительно были скачаны на сервер. Если в момент анализа ЭУМКД выясняется, что файлы на сервере отсутствуют, они автоматически будут скачаны и использованы во всех последующих запусках анализа данного ЭУМКД. Для пользователя реализован интерфейс, который позволит скачать файлы сразу из нескольких курсов, обновить уже скачанные ранее файлы или скачать файлы недавно созданных (новых) курсов. Для хранения форм и таблиц в виде файлов был создан корпоративный Google-аккаунт.

В настоящее время на ФДО ТУСУР проводится опытная эксплуатация разработанной инструментальной системы анализа и оценивания учебного контента, также рассматриваются варианты ее использования:

- для анализа ЭУМКД с целью выявления качества отдельных ЭОР;

- проведения разнообразных конкурсов авторов и кафедр вуза;

- определения общего уровня развития ЭУМКД на кафедрах, факультетах, в вузе в целом и определения направлений совершенствования;

- формирования плана мероприятий модернизации электронного контента ФДО.

#### Литература

1. Развитие программно-методического обеспечения технологий электронного обучения в ТУСУРе / А.В. Городович, О.Ю. Исакова, И.А. Кречетов, В.В. Кручинин, Ю.В. Морозова, В.В. Романенко, И.П. Черкашина // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 3. – С. 62–69.
2. Текущее состояние и проблемы модернизации контента в системе электронного обучения ТУСУР / А.В. Городович, В.В. Кручинин, М.Ю. Перминова // Современное образование: качество образования и актуальные проблемы современной высшей школы: матер. междунар. науч.-метод. конф. – Томск, 2019. – С. 109–111.
3. Краснова Г.А. Электронное образование в эпоху цифровой трансформации / Г.А. Краснова, Г.В. Можаяева. – Томск: ИД Том. гос. ун-та, 2019. – 200 с.
4. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ: учеб. пособие. – М.: КНОРУС, 2010. – 224 с.
5. Многокритериальное оценивание электронных учебно-методических комплексов / А.В. Городович, В.В. Кручинин, М.Ю. Перминова, Ю.В. Морозова // Матер. Междунар. конф. по новым образовательным технологиям (EdCrunch Томск), Томск, 29–31 мая 2019 г. – Томск: ИД Том. гос. ун-та, 2019. – С. 103–112.
6. Морозова Ю.В. Методика анализа электронного учебного контента / Ю.В. Морозова, И.А. Уртамова // Открытое и дистанционное образование. – 2017. – № 4(68). – С. 38–44.
7. Городович А.В. Метод определения степени креолизации учебного текста в электронных системах обучения / А.В. Городович, В.В. Кручинин, М.Ю. Перминова // Современные тенденции развития непрерывного образования: вызовы цифровой экономики: матер. междунар. науч.-метод. конф. – Томск: Изд-во Том. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – С. 74–75.
8. Рябинина Н.З. Технология редакционно-издательского процесса: учеб. пособие. – М.: Логос, 2012. – 255 с.
9. Ердяков С.В. Критерии и методы укрупнённой оценки качества изображений в растровых графических форматах [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.aiportal.ru/articles/other/evaluation-of-image-quality.html>, свободный (дата обращения: 19.06.2019).

10. Кротова И.В. Возможности системно-параметрического анализа совместимости наглядности в учебной литературе [Электронный ресурс] / И.В. Кротова // Вестн. Том. гос. ун-та. – 2008. – № 314. – С. 177–183.

11. Кротова И.В. Системно-параметрический анализ совместимости наглядности школьных учебников [Электронный ресурс] / И.В. Кротова // Сибирский педагогический журнал. – 2008. – № 11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemno-parametricheskiy-analiz-sovmestimosti-naglyadnosti-shkolnyh-uchebnikov>, свободный (дата обращения: 19.06.2019).

12. Кручинин В.В. Онтологическая модель системы оценивания электронного учебного контента вуза / В.В. Кручинин, А.В. Городович, М.Ю. Перминова // Открытое и дистанционное образование. – 2019. – № 3 (75). – С. 36–41.

13. Vasantha Raju N., Harinarayana N.S. Online survey tools: A case study of Google Forms [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/326831738\\_Online\\_survey\\_tools\\_A\\_case\\_study\\_of\\_Google\\_Forms](https://www.researchgate.net/publication/326831738_Online_survey_tools_A_case_study_of_Google_Forms), свободный (дата обращения: 19.06.2019).

14. Kumar Kishore, Naik Lokesh. How to create an online survey by using Google forms // International Journal of Library and Information Studies. – 2016. – № 6(3). – P. 118–126 [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/333369585\\_HOW\\_TO\\_CREATE\\_AN\\_ONLINE\\_SURVEY\\_BY\\_USING\\_GOOGLE\\_FORMS](https://www.researchgate.net/publication/333369585_HOW_TO_CREATE_AN_ONLINE_SURVEY_BY_USING_GOOGLE_FORMS), свободный (дата обращения: 19.06.2019).

15. Mondal H., Mondal S., Ghosal T., Mondal S. Using Google Forms for Medical Survey: A Technical Note // International Journal of Clinical and Experimental Physiology. 2019. – № 5(4). – P. 216–218 [Электронный ресурс]. – URL: <https://doi.org/10.5530/ijcep.2018.5.4.26>, свободный (дата обращения: 19.06.2019).

16. Микони С.В. Инструментальная система для решения задач многокритериального выбора / С.В. Микони, Д.П. Бураков, М.И. Гарина // Программные продукты и системы. – 2009. – № 4 [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/instrumentalnaya-sistema-dlya-resheniya-zadach-mnogokriteriального-vybora>, свободный (дата обращения: 14.05.2020).

17. Decision Analysis Software Survey [Электронный ресурс]. – URL: [informs.org/ORMS-Today/OR-MS-Today-Software-Surveys/Decision-Analysis-Software-Survey](https://informs.org/ORMS-Today/OR-MS-Today-Software-Surveys/Decision-Analysis-Software-Survey), свободный (дата обращения: 19.06.2019).

18. Городович А.В. Задача и алгоритмы формирования плана мероприятий модернизации учебного контента / А.В. Городович, В.В. Кручинин, С.П. Сущенко // Доклады ТУСУР. – Томск, 2019. – Т. 22, № 4. – С. 69–74. – DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-69-74

#### Городович Андрей Викторович

И.о. директора Института инноватики (ИИ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), ассистент каф. технологий электронного обучения (ТЭО) факультета дистанционного обучения (ФДО) ИИ ТУСУР Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 90-01-88  
Эл. почта: [gaw@2i.tusur.ru](mailto:gaw@2i.tusur.ru)

#### Кречетов Иван Анатольевич

Зав. лаб. инструментальных систем моделирования обучения (ЛИСМО) научного управления (НУ) ИИ Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-54  
Эл. почта: [kia@2i.tusur.ru](mailto:kia@2i.tusur.ru)

#### Кручинин Владимир Викторович

Д-р техн. наук, доцент, зав. каф. ТЭО ФДО ИИ ТУСУР Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-5564-2797  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-52  
Эл. почта: [kru@2i.tusur.ru](mailto:kru@2i.tusur.ru)

#### Перминова Мария Юрьевна

Канд. техн. наук, нач. учебно-методического отдела ФДО ИИ, доцент каф. ТЭО ФДО ИИ ТУСУР Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-53  
Эл. почта: [pmy@2i.tusur.ru](mailto:pmy@2i.tusur.ru)

Gorodovich A.V., Krechetov I.A.,

Kruchinin V.V., Perminova M.Yu.

#### Tool system for analysis and evaluation of learning content

The paper discusses the issues of developing a tool system for analysis and evaluation of learning content of a university. It identifies requirements for such a system and proposes analysis algorithms. The paper defines two types of criteria for content evaluation: automatic, with their values set based on analysis algorithms, and expert criteria that are based on a survey. All criteria are put in the knowledge base. The paper proposes an original tool system structure that includes a knowledge base, e-learning resource base, modules for the procedure of assessment, analysis, processing, review and planning of e-learning resource modernization.

**Keywords:** tool system, e-learning resource, criterion, knowledge base, structure, assessment procedure.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-81-88

#### References

1. Gorodovich A.V., Isakova O.Yu., Krechetov I.A., Kruchinin V.V., Morozova Yu.V., Romanenko V.V., Cherkashina I.P. [Evolution of technical and didactic solutions for e-learning technologies in TUSUR]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, no. 3, pp. 62–69 (in Russ.).

2. Gorodovich A.V., Kruchinin V.V., Perminova M.Yu. *Tekushchee sostoyanie i problemy modernizatsii kontenta v sisteme elektronного obucheniya TUSUR* [Current state and problems of content modernization in the e-learning system of TUSUR University]. *Sovremennoye obrazovaniye: kachestvo obrazovaniya i aktual'nyye problemy sovremennoy vysshey shkoly. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoy konferentsii [Modern education: the quality of education and current problems of modern higher education. Proc. of the International scientific and methodological conference]*. Tomsk, TUSUR Publ., 2019. Pp. 109–111 (in Russ.).

3. Krasnova G.A., Mozhaeva G.V. *Elektronnoye obrazovaniye v epokhu tsifrovoy transformatsii* [E-education in the era of digital transformation]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2019. 200 p. (in Russ.).

4. Tarasenko F.P. *Prikladnoy sistemnyy analiz* [Applied system analysis]. Moscow, KNORUS Publ., 2010. 224 p. (in Russ.).

5. Gorodovich A.V., Kruchinin V.V., Perminova M.Yu., Morozova Yu.V. *Mnogokriterial'noe ocenivanie elektronnyh*



- uchebno-metodicheskikh kompleksov* [Multi-criteria evaluation of electronic study complexes]. *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii po novym obrazovatel'nykh tekhnologiyam* [Proc. of the International conference on new educational technologies] (EdCrunch Tomsk). Tomsk, Tomsk State University Publ., 2019. Pp. 103–112 (in Russ.).
6. Morozova Yu.V., Urtamova I.A. [Methodology of analysis of electronic educational content]. *Open and distance education*, 2017, vol. 68, no 4, pp. 38–44 (in Russ.).
7. Gorodovich A.V., Kruchinin V.V., Perminova M.Yu. *Metod opredeleniya stepeni kreolizatsii uchebnogo teksta v elektronnykh sistemah obucheniya* [Method for determining the extent of training text creolization in e-learning systems]. *Sovremennyye tendentsii razvitiya nepreryvnogo obrazovaniya: vyzovy tsifrovoy ekonomiki. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Current Trends in Continuing Education: Challenges of the Digital Economy. Proc. of the International scientific and methodological conference]. Tomsk, TUSUR Publ., 2020. Pp. 74–75 (in Russ.).
8. Ryabinina N.Z. *Tekhnologiya redaktsionno-izdatel'skogo protsesssa* [Publishing Process Technology]. Moscow, Logos Publ., 2012. 255 p. (in Russ.).
9. Erdyakov S.V. *Kriterii i metody ukрупnennoi otsenki kachestva izobrazheniy v rastrovnykh graficheskikh formatakh* [Criteria and methods for broad assessment of image quality in raster graphics formats]. Available at: <http://www.aiportal.ru/articles/other/evaluation-of-image-quality.html> (Accessed: Jun 19, 2019).
10. Krotova I.V. [The possibilities of systemic-parametrical analysis of visualization in training literature compatibility]. *Tomsk state university journal*, no. 314, pp. 177–183 (in Russ.).
11. Krotova I.V. [System-parametric analysis of the compatibility of the visibility of school books]. *Sibirskii pedagogicheskii zhurnal*, 2008, no. 11. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemno-parametricheskii-analiz-sovmestimosti-naglyadnosti-shkolnyh-uchebnikov>. (Accessed: Jun 19, 2019).
12. Kruchinin V.V., Gorodovich A.V., Perminova M.Yu. [Ontological model of an e-learning content assessment system]. *Open and distance education*, 2019, vol. 75, no. 3, pp. 36–41.
13. Vasantha Raju N., Harinarayana N.S. Online survey tools: A case study of Google Forms. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/326831738\\_Online\\_survey\\_tools\\_A\\_case\\_study\\_of\\_Google\\_Forms](https://www.researchgate.net/publication/326831738_Online_survey_tools_A_case_study_of_Google_Forms) (Accessed: Jun 19, 2019).
14. Kumar, Kishore, Naik, Loksha How to create an online survey by using Google forms. *International Journal of Library and Information Studies*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 118–126. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/333369585\\_HOW\\_TO\\_CREATE\\_AN\\_ONLINE\\_SURVEY\\_BY\\_USING\\_GOOGLE\\_FORMS](https://www.researchgate.net/publication/333369585_HOW_TO_CREATE_AN_ONLINE_SURVEY_BY_USING_GOOGLE_FORMS). (Accessed: Jun 19, 2019).
15. Mondal H., Mondal S., Ghosal T., Mondal S. Using Google Forms for Medical Survey: A Technical Note. *International Journal of Clinical and Experimental Physiology*, 2019, vol. 4, no. 5, pp. 216–218. Available at: <https://doi.org/10.5530/ijcep.2018.5.4.26>. (Accessed: Jun 19, 2019).
16. Mikoni S.V. [Tool system for solving multi-criteria selection problems]. *Programmnyye produkty i sistemy*, 2009, no. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/instrumentalnaya-sistema-dlya-resheniya-zadach-mnogokriterialnogo-vybora>. (Accessed: May 14, 2020).
17. Decision Analysis Software Survey. Available at: <https://www.informs.org/ORMS-Today/OR-MS-Today-Software-Surveys/Decision-Analysis-Software-Survey>. (Accessed: June 19, 2019).
18. Gorodovich A.V., Kruchinin V.V., Suschenko S.P. [Task and algorithms to conceive an action plan for the updating of learning content]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 69–74 (in Russ.).

---

#### Andrey V. Gorodovich

Acting Director,  
Institute of Innovations (II), Tomsk State University of  
Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
Assistant, Department of e-learning technology (ELT),  
Faculty of Distance Learning (DL), II, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 90-01-88  
Email: [gaw@2i.tusur.ru](mailto:gaw@2i.tusur.ru)

#### Ivan A. Krechetov

Head, Laboratory of Instrumental Modelling and Learning  
Systems, II, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-15-54  
Email: [kia@2i.tusur.ru](mailto:kia@2i.tusur.ru)

#### Vladimir V. Kruchinin

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor,  
Head of Department, ELT Department, DL Faculty, II,  
TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-5564-2797  
Phone: +7 (382-2) 70-15-52  
Email: [kru@2i.tusur.ru](mailto:kru@2i.tusur.ru)

#### Maria Yu. Perminova

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor,  
ELT Department, DL Faculty, II, TUSUR  
Head of Division, Curriculum Support Office, DL Faculty, II,  
TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-15-53  
Email: [pmy@2i.tusur.ru](mailto:pmy@2i.tusur.ru)

УДК 004.89

**М.Ю. Катаев, А.Е. Мосяев****Определение положения головы относительно цифровой видеокамеры, установленной на компьютере**

В настоящее время все большую популярность завоевывают приложения, требующие отслеживания положения головы человека (например, видеоконференции, компьютерные игры, виртуальная реальность и т.п.). Особенно стимулируются исследования, направленные на решение задач компьютерного зрения для нахождения движений головы в режиме реального времени. Особенность предлагаемого решения заключается в том, что отслеживание головы может выполняться без использования дорогих видеокамер, реализующих стерео или более сложные измерения, а всего лишь с помощью одной цифровой камеры. Нами предлагается методика, основанная на подходе компьютерного зрения, которая позволяет обнаруживать движения головы пользователя, сидящего за настольным компьютером или ноутбуком. Методика опирается на маску лица человека, которая получается с помощью заранее обученной сверточной нейронной сети. Полученная маска преобразуется в необходимый формат, относительно которого далее по ключевым точкам лица оцениваются наклоны и повороты головы. Приводится структура разработанной программы и результаты обработки измерений.

**Ключевые слова:** движения головы, компьютерное зрение, изображение, методы обработки.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-89-94

Задача человеко-машинного взаимодействия требовала технических решений в области получения видеоизображений и разработки алгоритмов и программ для получения эффективных, быстродействующих решений оценки действий человека. Лишь только около 10 лет назад стали появляться решения компьютерного зрения для решения задачи контроля действий человека и отслеживания движений головы в реальном времени при работе с компьютером. Этому способствовало удешевление и ускорение видео и компьютерного оборудования, позволяющее вести обработку изображений в реальном времени. Решения, основанные на подходах компьютерного зрения [1, 2], привлекательны тем, что позволяют решить задачу отслеживания движений головы в режиме реального времени без использования дорогих видеокамер и специальных условий для этого. Кроме того, решения компьютерного зрения предлагают гибкость, поскольку они могут использоваться в более широком диапазоне ситуаций, связанных с изменением величины освещения и сложности фона. Однако пока еще большинство исследований компьютерного зрения недостаточно эффективно решает задачи анализа изображений, где присутствует сложная сцена (сложная структура фона, шум камеры при недостаточности освещения, перемещение сторонних объектов и др.).

Существует термин «трекинг» (tracking) [3], который связан с отслеживанием перемещения объектов на изображении от кадра к кадру. При этом анализируются кадры видеопоследовательности и определяется положение движущихся объектов. Данная задача имеет широкий спектр применений: система обеспечения безопасности, анализ потока машин на автомагистрали, комментирование спортивных мероприятий по видео, организация прозрачной работы офиса, система дополненной реальности, различные научные исследования, робототехника, «умный дом», интерактивные и игровые

приложения. При решении этой задачи разработаны и используются разными научными группами методы математического анализа, статистики, обработки изображений, теории принятия решений и систем искусственного интеллекта. Формально задача отслеживания перемещения произвольного объекта в потоке изображений (видео) является не разрешимой, без учета необходимых ограничений, например, перекрытия одного объекта другим, изменение освещенности, сложный фон и т.д.

Среди всех задач трекинга существует задача отслеживания движений головы в плоскости, параллельной монитору. Движения включают повороты, наклон и поднятие головы [4–8]. Повороты головы по глубине (вне плоскости) в настоящей версии статьи не рассматриваются. Данная тема является достаточно проработанной, однако, кроме получения координат положения центра тяжести головы в плоскости монитора, более ничего не производится, что ограничивает применение разработанных технологий на практике. Нами предлагается методика, позволяющая находить параметры движений головы в режиме, близком к реальному времени, в плоскости нахождения головы, удаленной от монитора.

**Постановка задачи**

Решая задачу нахождения лица человека [9, 10] на изображении, надо учитывать возможные изменения положения головы и соответствующие углы поворота относительно вертикали и наклонов головы вправо-влево и вперед-назад, которые могут оказывать не просто существенное влияние на ошибки обнаружения, но и приводить к ситуациям, когда задача не решается. Рассмотрим некоторые особенности этого вопроса на примере рис. 1, где показаны направления движения головы человека с точки зрения камеры, расположенной на мониторе пользователя.

Рисунок 1 показывает возможность потери такого признака, как глаза, при наклоне головы вперед,

так как при наклоне головы вперед происходит загромождение глаз надбровными дугами. Эта ситуация относится в полной мере и к повороту головы в горизонтальной плоскости, при котором может происходить, к примеру, загромождение одного глаза переносицей.

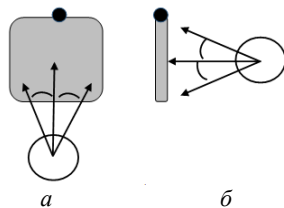


Рис. 1. Измерение движения головы человека (окружность) камерой (черная точка), расположенной на мониторе пользователя для случая: *a* – поворотов и *б* – наклонов головы

Заметим, что поворот головы относительно направления наблюдения камеры или смена положения (высоты установки, расстояния от камеры до человека) и направления обзора камеры для положения головы могут создавать одни и те же проблемы. Эти проблемы необходимо знать и учитывать их при составлении алгоритмов обработки изображений.

Помимо потери ключевых точек лица при поворотах и наклонах, происходит изменение геометрической фигуры лица человека от эллипса с одним размером (прямая между точками висков) до меньшего размера, а также изменение размеров осей эллипса. При поворотах будет происходить сужение эллипса, а при наклоне будет сжатие формируемого изображения тем большее, чем больше наклон вверх или вниз. Заметим, что так как голова человека расположена на расстоянии 50–90 см от монитора, то камера, установленная под разными углами к плоскости лица в вертикальной плоскости, практически не влияет на изменение геометрических размеров лица. Однако тем не менее такого рода изменения также должны быть учтены при обработке изображений.

Движение головы человека неотделимо от изменения положения шеи и в некоторых случаях плечей (при больших углах наклона или поворота). Литературный обзор [3–13] выявил широкий спектр методик и технических средств для отслеживания движения головы относительно монитора. Не во всех публикациях говорится о достигаемой точности оценки углов поворота и наклона, а также о диапазонах поворота и наклона головы. Имеется большое количество алгоритмов, позволяющих обнаруживать и распознавать лица на изображении. Приведем некоторые из них, в основе которых лежат: Марковские модели, графы, метод главных компонент, линейный дискриминантный анализ, алгоритмы, основанные на цвете кожи человека, на вейвлетах, на искусственных нейронных сетях и др. [1–16].

Задача оценки движений головы человека начинается с решения задачи поиска объекта (головы человека) на изображении. Для этого часто применяют классические методики компьютерного зрения,

такие как цветные фильтры, если объект существенно выделяется на фоне по цвету. В таком случае можно подобрать соответствующий фильтр из комбинации RGB-каналов и ограничений по величине, связанный с цветом кожи. Метод цветных фильтров можно применять в случаях, когда объект существенно отличается от фона по цвету и освещению равномерно и не изменяется от кадра к кадру. Поэтому параллельно с первым методом применяют и второй – поиск, выделение и анализ контуров, если мы знаем, что объект имеет форму, например, круга (эллипса). Для нахождения контуров необходимо найти и выделить границы объекта на изображении. Границы – это места резкого изменения градиента яркости, и их можно найти, например, с помощью метода Канни (Canny) [17]. Далее проверяются выделенные линии-границы на соответствие геометрическим контурам объекта, что можно сделать с помощью метода Хафа (Hough Transform) [18]. Другой подход связан с сопоставлением выделенных объектов на изображении с шаблоном. Заметим, что если изображение имеет множество мелких деталей, то анализ контуров может быть затруднен. В последнее время часто применяются методы машинного обучения, когда необходимо обучить классификатор на учебном наборе изображений с известным объектом, некоторым способом разделяя изображение на части и проверяя классификатором каждую часть на наличие этого объекта [17, 18].

Предлагаемый в статье подход связан с обнаружением положения лица человека на изображении, определении его ключевых точек (контур лица и глаза) и на основе их расположения в пространстве вычислять характеристики движения головы. Предлагаемая методика позволяет на основе положения ключевых точек определять положение головы в трехмерном пространстве, что важно для решения научных и практических приложений.

#### Методика выделения лица человека на изображении

В последние годы все большую популярность в практике распознавания лиц приобретают методы автоматизированного анализа видеозаписей, основанные на различных математических принципах. Однако использование этих методов требует учета разного рода особенностей, связанных с их практическим применением, что оказывает существенное влияние на получаемые результаты. Нами в работе сделан упор на использование метода нейронных сетей в одной из его распространенных реализаций – предварительно обученных сверточных нейронных сетей (CNN) [19].

В основу разрабатываемой программы (рис. 2) положена методика обработки изображений и анализа получаемых результатов.

На рис. 2 представлена последовательность этапов вычислительной программы, на которой показаны все вышеперечисленные этапы: считывание видеопотока, выделение лица человека, построение маски и оценка углов поворота и наклона головы

человека. Можно сказать, что выделенная на изображении маска лица человека преобразуется в набор параметров, на основе которых определяются углы поворота и наклона. Последовательность этих углов позволяет отслеживать положение головы человека относительно цифровой камеры, установленной на мониторе компьютера (или ноутбуке). Временной набор углов положения головы в пространстве подлжит последующему анализу с помощью соответствующих статистических методик для оценки пространственно-временных характеристик.

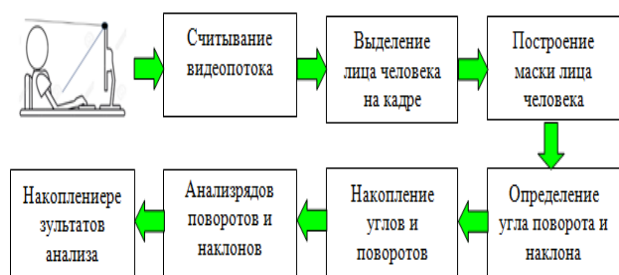


Рис. 2. Последовательность этапов разработанной программы оценки углов поворота и наклона головы человека

Применяемые методики являются типичными для компьютерного зрения и в данной работе более связаны с анализом геометрии ключевых точек лица человека. Программа реализует несколько этапов:

1. Считывание видеопотока и выбор отдельных кадров (в данной работе каждый 10-й кадр, что составляет примерно 0,3 с).
2. Обнаружение лица человека на изображении (текущем кадре) с помощью, заранее обученной сверточной нейронной сети (CNN).
3. На основе полученных на этапе 2 результатов строится маска лица человека, состоящая из 21 точки, описывающих контур лица и глаз (рис. 3).
4. Вычисление размеров (ширина и высота маски, расстояний между глазами, глазами и краем маски, размерами самих глаз (рис. 4)).
5. Определение угла поворота и наклона головы по изменению наклона и размера элементов маски.
6. Анализ найденных углов поворота и наклона.

Для анализа нами из видеопотока выбирается каждый десятый кадр (примерно время 0,3 с для частоты измерений 30 кадров в секунду). Такое время является достаточным для отслеживания изменения положения головы во время работы за компьютером (отсутствие быстрых изменений). Меньшее время обработки будет приводить к получению избыточных данных, которые слабо будут отличаться между собой в период изменения положения головы. Естественно, что в задачах, где время анализа должно быть наименьшим, например, для контроля движений водителя, обрабатывать можно каждый кадр видеопотока (время 0,03 с).

На рис. 3 представлена полученная маска лица, состоящая из набора точек, которые связаны с контуром лица и глазами. Маска получена с помощью предварительно обученной сверточной нейронной

сети. Сверточная нейронная сеть предназначена для обнаружения лица человека на изображении и построении маски лица. Видно, что маска с высокой точностью находит ключевые точки в районе расположения глаз и не захватывает уши, что важно для детектирования правильного расстояния между ключевыми точками. Наблюдается нечеткая оценка положения подбородка, но это не влияет на методику в целом.

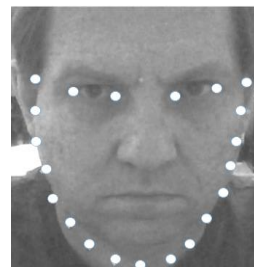


Рис. 3. Маска лица человека, построенная на основе сверточной нейронной сети (CNN)

Для вычисления углов поворота и наклона головы применяется множество методик, о чем было сказано выше, однако в каждом показанном подходе есть достаточно высокая вычислительная сложность, что затрудняет переход к реальному времени. Для решения этой задачи поворота головы нами предлагается исследовать вариант, связанный с расчетом расстояний между левым краем маски и глазом (расстояние AB), между глазами (CD) и между глазом и краем маски (расстояние EF) (см. рис. 4).

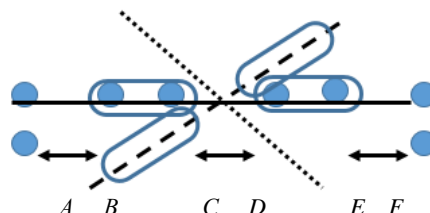


Рис. 4. Описание основных элементов оценки углов поворота и наклона (точки – элементы маски, а овалы – глаза человека)

Направление и величину поворотов головы достаточно легко определить из контроля отношения  $C=AB/EF$ . Величина  $C$  меньше единицы при повороте направо и больше единицы при повороте головы налево. Наклон прямой, проведенный через ключевые точки, которые связаны с положением глаз человека, позволяют с высокой точностью оценить наклоны головы. Для оценки углов необходимо знать положение глаза с момента движения головы до завершения движения (см. рис. 4).

Для того чтобы оценить точность оценки углов ориентации головы, нами были использованы результаты базы данных изображений HPID с фиксированными углами поворотов и наклонов. База данных изображений HPID (Head Pose Image Database) содержит 15 наборов, состоящих из 93 полутоновых изображений разных людей. В базе даны изображения в формате Jpeg для двух направлений: верти-

кальный угол =  $\{-90, -60, -30, -15, 0, +15, +30, +60, +90\}$  и горизонтальный угол =  $\{-90, -75, -60, -45, -30, -15, 0, +15, +30, +45, +60, +75, +90\}$ . Найдя соотношение между отрезками ( $AB$ ), ( $CD$ ) и ( $EF$ ) для этой базы, нами получены диапазоны значений, которые являются шкалой для оценки поворота и наклона головы человека.

### Полученные результаты

На основе вышеприведенной методики разработан комплекс программ на языке программирования Python. Для обнаружения лица применяется библиотека Dlib [<http://dlib.net>], откуда взята предварительно обученная сверточная нейронная сеть [[http://dlib.net/cnn\\_face\\_detector.py.html](http://dlib.net/cnn_face_detector.py.html)] для построения маски лица (shape predictor 68 face landmarks). Из этих точек нами для работы была оставлена 21 точка (см. рис. 3). Для обработки изображений использована библиотека компьютерного зрения OpenCV [<https://opencv.org>]. Для обработки поступающих данных применяется библиотека Pandas [<https://pandas.pydata.org>]. Для визуализации полученных результатов – библиотека Matplotlib [<https://matplotlib.org>].

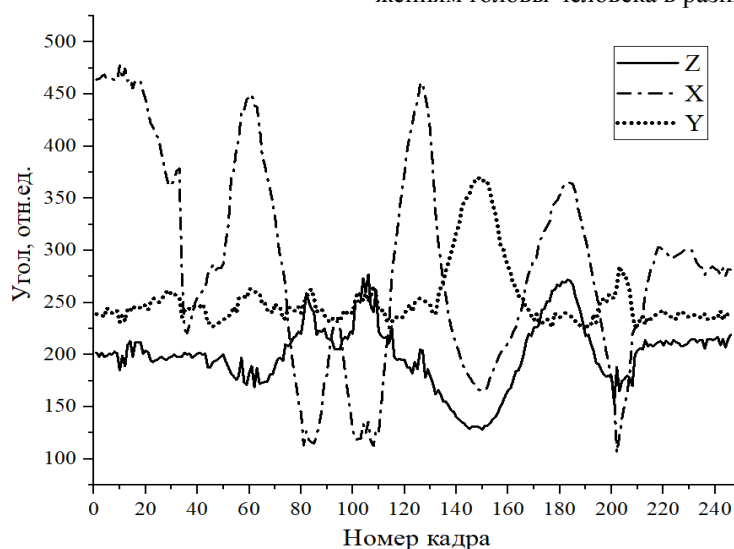


Рис. 5. Результаты обработки реального видео при оценке углов поворота и наклона головы человека

### Заключение

В статье приводится описание методики оценки углов движения головы в пространстве относительно цифровой камеры, установленной на компьютере. Нами разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК), который может найти свое приложение в медицинских, спортивных целях, при контроле состояния водителя, ученика в школе и многих других приложениях. При разработке методики предполагалось, что она должна быть простой, быстрой, не требовать установки параметров изображения и выдавать понятный результат, который возможно анализировать. Анализ результатов в данной статье не рассматривался. Полученные с помощью ПАК результаты позволяют сделать вывод о работоспособности предлагаемой методики и достаточно малых погрешностях оценки углов поворота и наклона головы в режиме, близком к реальному времени.

Тестирование программы позволило выявить, что отслеживание движений головы в среднем оценивается с точностью до нескольких пикселей для расстояния между головой человека и камерой около 1 м. Крайние положения поворота головы, когда в поле видения камеры остается один глаз человека, нами считается за один максимальный угол. Также и для наклонов головы вверх и вниз, после некоторого угла угол наклона принимается максимальным и постоянным. Оценка производительности методики показала, что при обработке с последовательностью каждый 10-й кадр время обработки не влияет на получаемые результаты, т.е. его достаточно для получения, обработки и анализа полученных результатов.

На рис. 5 показан результат работы разработанной программы по предлагаемой методике, основная блок-схема которого представлена на рис. 2. При получении этого набора данных человек поднимал-опускал, поворачивал вправо-влево голову в течение 40 с, что составило 240 кадров. Из рис. 5 видно, что предлагаемый в работе подход к оценке поворотов и наклонов является чувствительным к разным движениям головы человека в разных плоскостях.

### Литература

1. Анисимов Б.В. Распознавание и цифровая обработка изображений. – М.: Высш. школа, 1983. – 295с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
3. Stern H. Adaptive Color space switching for tracking under varying illumination / H. Stern, B. Efron // International Journal of Image and Vision Computing. – 2005. – Vol. 23. – P. 34–57.
4. Кривцов О.А. Отслеживание положения головы человека в пространстве на основе анализа видеок кадров / О.А. Кривцов, А.М. Кориков // Доклады ТУСУР. – 2008. – № 2(18). – Ч. 2. – С. 32–39.
5. Кривцов О.А. Моделирование головы человека для задачи отслеживания ее положения на видеок кадрах // Доклады ТУСУР. – 2009. – № 1(19), ч. 1. – С. 109–115.
6. Катаев М.Ю. Восстановление углов поворота головы человека по изображениям / М.Ю. Катаев, Н.В. Кова-

лев, А.А. Грибоедов // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2(26), ч. 1. – С. 238–242.

7. Катаев М.Ю. Методика оценки угла поворота головы человека по анализу изображения / М.Ю. Катаев, Н.В. Ковалев, Н.Г. Катаева // Информатика и системы управления. – 2013. – № 1 (35). – С. 62–68.

8. Ньюнкин К.М. Определение углов наклонов головы человека на изображениях // Искусственный интеллект. – 2004. – № 1. – С. 243–250.

9. Viola P. Robust real-time face detection / P. Viola, M.J. Jones // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 57, No. 2. – P. 117–136.

10. Adini Y. Face recognition: The problem of compensating for changes in illumination direction / Y. Adini, Y. Moses, S. Ullman // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1997. – Vol. 19. – P. 721–732.

11. Chen W.L. Illumination compensation and normalization for robust face recognition using discrete cosine transform in logarithm domain / W.L. Chen, M.J. Er, S.Q. Wu // IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 2006. – Vol. 36. – P. 458–466.

12. Corcoran P. Improved HMM based face recognition system / P. Corcoran, C. Iancu, G. Costache. // OPTIM. – 2006. – No. 4. – P. 143–146.

13. Graham B. Face recognition using virtual parametric eigenspace signatures / B. Graham, N.M. Allinson // Image Processing and its Applications. – 1997. – No. 5. – P. 106–110.

14. Krueger N. An Algorithm for the Learning of Weights in Discrimination Functions Using a Priori Constraints // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1997. – Vol. 19. – P. 764–768.

15. Kazemi V. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees / V. Kazemi, J. Sullivan // The IEEE Xplore. – 2014. – No. 5. – P. 1867–1874.

16. Cootes T.F. Active shape models – their training and application / T.F. Cootes, C.J. Taylor, D.H. Cooper, J. Graham // Computer Vision and Image Understanding. – 1995. – Vol. 61. – P. 38–59.

17. Хорн Б.К.П. Зрение роботов. – М.: Мир, 1989. – 487 с.

18. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: БИНОМ, 2006. – 752 с.

19. Ji S. 3D convolutional neural networks for human action recognition / S. Ji, W. Xu, M. Yang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2013. – Vol. 35(1). – P. 221–231.

#### Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) 40, Ленина пр-т, Томск, Россия, 634050  
Тел.: (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85  
Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

#### Мосяев Андрей Евгеньевич

Студент каф. высокопроизводительных вычислений Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (ИТМО) 49, Кронверкский пр-т, г. Санкт-Петербург, Россия, 197101  
Тел.: +7-903-952-59-24  
Эл. почта: mae\_26@mail.ru

Kataev M.Yu., Mosyaev A.E.

#### Determining the head position regarding the digital video camera installed on a computer

Currently, applications that require tracking the position of the human head (for example, video conferences, computer games, virtual reality, etc.) are gaining more and more popularity. Especially stimulated are studies aimed at solving computer vision problems for finding head movements in real time. A feature of the proposed solution is that head tracking can be performed without the use of expensive video cameras that realize stereo or more complex measurements, but with just one digital camera. In this article, the authors propose a technique based on the computer vision approach that allows detecting detect head movements of a user sitting in front of computer or laptop. The technique relies on a person face-mask, obtained using a pre-trained convolutional neural network. The resulting mask is converted to the required format, relative to which, further, the key points of the face used to evaluate the inclinations and turns of the head. The article describes the structure of the developed program and the results of measurement processing.

**Keywords:** human head, computer vision, image, processing methods.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-89-94

#### Refeternces

1. Anisimov B.V. [Recognition and digital image processing]. Moscow, Higher School, 1983. 295 p. (in Russ.).

2. Gonzalez R., Woods R. [Digital image processing]. Moscow, Technosphere, 2006. 1072 p. (in Russ.).

3. Stern H., Efron B. Adaptive Color Space Switching For Tracking Under Varying Illumination. *International Journal of Image and Vision Computing*, 2005, vol. 23, pp. 34–57.

4. Krivtsov O.A., Korikov A.M. [Tracking the position of the human head in space based on the analysis of video frames]. *Proceedings of TUSUR University*, 2008, no. 2 (18), Part 2, pp. 32–39 (in Russ.).

5. Krivtsov O.A. [Modeling of the human head for the task of tracking its position on video frames]. *Proceedings of TUSUR University*, 2009, no. 1 (19), Part 1, pp. 109–115 (in Russ.).

6. Kataev M.Yu., Kovalev N.V., Griboedov A.A. [Restoration of angles of rotation of a person's head from images]. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 2 (26), part 1, pp. 238–242 (in Russ.).

7. Kataev M.Yu., Kovalev N.V., Kataeva N.G. [Methodology for assessing the angle of rotation of a person's head by image analysis]. *Informatics and Control Systems*, 2013, no. 1 (35), pp. 62–68 (in Russ.).

8. Nyunkin K.M. [Determination of the angles of inclination of the human head in the images]. *Artificial Intelligence*, 2004, no. 1, pp. 243–250 (in Russ.).

9. Viola P., Jones M.J. Robust real-time face detection. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 57, no. 2, pp. 117–136.

10. Adini Y., Moses Y., Ullman S. Face recognition: The problem of compensating for changes in illumination direction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, vol. 19, pp. 721–732.

11. Chen W.L., Er M.J., Wu S.Q. Illumination compensation and normalization for robust face recognition using discrete cosine transform in logarithm domain. *Systems, Man and Cybernetics*, 2006, Part B, no. 36, pp. 458–466.

12. Corcoran P., Iancu C., Costache G. Improved HMM based face recognition system. *OPTIM*, 2006, no. 4, pp. 143–146.

13. Graham B., Allinson N.M. Face recognition using virtual parametric eigenspace signatures. *Image Processing and its Applications*, 1997, no. 5, pp. 106–110.

14. Krueger N. An Algorithm for the Learning of Weights in Discrimination Functions Using a Priori Constraints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, vol. 19, pp. 764–768.

15. Kazemi V., Sullivan J. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees. *The IEEE Xplore*. 2014, no. 5, pp. 1867–1874.

16. Cootes T.F., Taylor C.J., Cooper D.H., Graham J. Active shape models – their training and application. *Computer Vision and Image Understanding*, 1995, vol. 61, pp. 38–59.

17. Horn B.K.P. [Vision robots]. Moscow, Mir, 1989. 487 p. (in Russ.).

18. Shapiro L., Stockman J. [Computer vision]. Moscow, BINOM, 2006. 752 p. (in Russ.).

19. Ji S., Xu W., Yang M. 3D convolutional neural networks for human action recognition. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, 2013, vol. 35 (1), pp. 221–231.

**Mikhail Y. Kataev**

Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Department of Automated Control Systems (ACS),  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85  
Email: kmy@asu.tusur.ru

**Andrey E. Mosyaev**

Student, Department of High Performance Computing  
St. Petersburg National Research University of Information  
Technologies, Mechanics and Optics (ITMO)  
49, Kronverksky Ave., St. Petersburg, Russia, 197101  
Phone: +7-903-952-59-24  
Email: mae\_26@mail.ru

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**





УДК 621.314

А.В. Осипов, И.М. Журавлев

## Резонансные преобразователи постоянного напряжения с кодо-импульсным регулированием

Рассмотрены характеристики преобразователей постоянного напряжения с кодо-импульсным регулированием. Предложена бестрансформаторная топология резонансного преобразователя с однополярным кодо-импульсным регулированием, обеспечивающая регулирование одной полуволны тока резонансного контура. Показана линейность пульсации тока резонансного контура, что позволяет проводить анализ на основе эквивалентных схем понижающих преобразователей постоянного напряжения. Получены зависимости амплитуды пульсации тока резонансного контура от кратности модуляции.

**Ключевые слова:** последовательный резонансный преобразователь, кодо-импульсное регулирование, бестрансформаторная топология.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-97-102

Применение резонансных преобразователей является перспективным направлением повышения энергетической эффективности преобразования энергии в первую очередь из-за возможности обеспечения мягкой коммутации транзисторов [1, 2]. Однако их широкому внедрению препятствуют сложные алгоритмы управления, реализующие непрерывное широтно-импульсное регулирование, требующее подстройки частоты для сохранения режима мягкой коммутации. Поэтому часто применяются резонансные преобразователи с дискретным регулированием, которое может быть реализовано релейным или кодо-импульсным способом [3–5].

При кодо-импульсном регулировании (КИР) управляющее воздействие в преобразователе реализуется формированием набора импульсов, имеющего определенное сочетание интервалов вынужденных и свободных колебаний, определяемое заданным кодом. Поэтому данный метод регулирования заключается в управлении полупериодами тока резонансного контура, при реализации понижающего регулирования он состоит в изменении числа полупериодов потребления тока от источника питания к числу полупериодов передачи тока в нагрузку.

Наиболее широкое применение системы управления с КИР нашли в установках индукционного нагрева, так как при характерных для этих систем высоких значениях добротности колебательного контура он позволяет регулировать в широком диапазоне непрерывный ток нагрузки с малыми пульсациями [3–5]. В целом КИР может применяться и в преобразователях постоянного напряжения, в частности, в системах электропитания с буферным включением аккумуляторной батареи, напряжение которой является напряжением нагрузки, в этом случае зарядный ток аккумулятора не требует высокой точности стабилизации, и КИР может успешно применяться.

В резонансных преобразователях дискретное регулирование, в отличие от непрерывного, не требует подстройки частоты для сохранения резонансного режима работы, что позволяет существенно упростить систему управления. Кроме того, изолированным резонансным преобразователям, постро-

енным на основе двойного активного моста, присущи большие массогабаритные показатели [6–8], обусловленные, прежде всего, наличием согласующего трансформатора [6–12]. Поэтому в данной работе поставлена цель синтеза бестрансформаторного резонансного преобразователя с КИР.

### Кодо-импульсное регулирование в изолированном резонансном преобразователе

В общем случае резонансный преобразователь постоянного напряжения с КИР может быть реализован по классической структуре (рис. 1, а). Регулирование выходного напряжения при КИР достигается изменением количества импульсов напряжения инвертора, подключаемых к контуру за период модуляции  $T_m$ , на котором, таким образом, присутствуют интервал вынужденных колебаний  $T_{имп}$  (резонансный контур подключается к инвертору) и интервал свободных колебаний  $T_0$  (контур отключен от инвертора и замкнут на нагрузку) (рис. 1, б). Поэтому инвертор в режиме кодо-импульсного регулирования имеет два временных интервала, кратных периоду колебаний синусоидального тока: интервал потребления тока, при котором путем поочередного замыкания диагоналей инвертора напряжение прикладывается к контуру, и интервал закоротки, образованный открытым состоянием двух смежных транзисторов инвертора, при котором напряжение инвертора равно нулю. Рабочая частота преобразователя постоянна и равна резонансной, что позволяет обеспечить режим мягкой коммутации транзисторов.

В преобразователях постоянного напряжения, в отличие от последовательного инвертора, из-за наличия емкостного фильтра, к контуру прикладывается прямоугольное напряжение

$$\begin{cases} U_{LC} = U_{вх} - U_{вых}, & \text{при } t \in T_{имп}, \\ U_{LC} = U_{вых}, & \text{при } t \in T_0, \end{cases}$$

где  $U_{LC}$  – напряжение, прикладываемое к резонансному контуру;  $U_{вх}$  – входное напряжение,  $U_{вых}$  – выходное напряжение.

Это приводит к линейному росту амплитуды тока контура. Изменение амплитуды тока за один период несущей частоты можно выразить соотношением

$$\Delta I_1 = \pi \cdot \frac{U_{LC\_1m}}{\rho}$$

где  $U_{LC\_1m}$  – первая гармоника напряжения, прикладываемого к контуру,  $\rho$  – его волновое сопротивление.

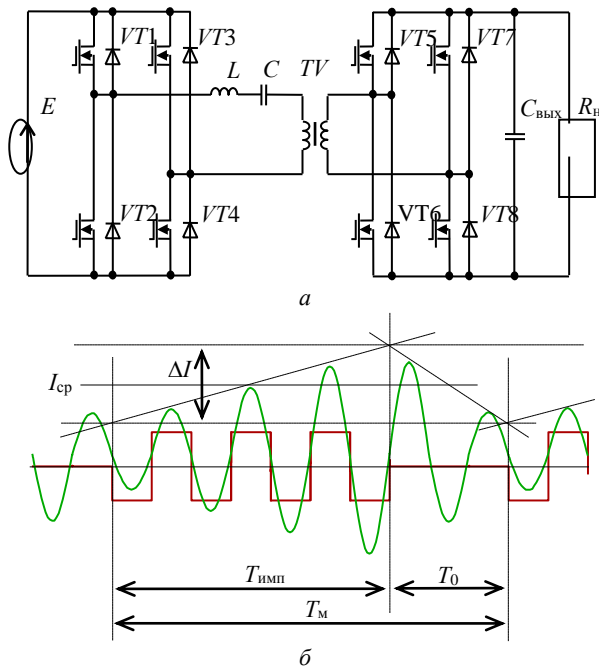


Рис. 1. Резонансный преобразователь с кодо-импульсным регулированием – а; б – диаграммы его работы при  $\gamma = 0,7$

Поэтому пульсация амплитуды тока контура на интервале передачи энергии и закоротки

$$\Delta I = 2 \cdot \frac{U_{вх} - U_{ввых}}{\rho} \cdot \gamma \cdot \nu = 2 \cdot \frac{U_{ввых}}{\rho} \cdot (1 - \gamma) \cdot \nu,$$

где  $\gamma = T_{имп} / T_m$  – отношение количества периодов вынужденных колебаний к количеству периодов на интервале модуляции;  $\nu$  – кратность резонансной частоты к частоте модуляции.

Учитывая линейную регулировочную

$$U_{ввых} = \gamma \cdot U_{вх}$$

при фиксированном входном напряжении, амплитуда пульсаций может быть выражена

$$\Delta I = 2 \cdot \frac{U_{вх}}{\rho} \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma) \cdot \nu.$$

Таким образом, амплитуда пульсаций определяется волновым сопротивлением и не зависит от нагрузки.

**Бестрансформаторный резонансный преобразователь с кодо-импульсным регулированием**

Бестрансформаторный преобразователь построен на основе мостового инвертора, включенного по вольтодобавочной структуре (рис. 2, а). Такое включение инвертора не требует трансформатора для получения постоянного напряжения на нагрузке. Были попытки реализации похожей топологии с дискретным регулированием [13, 14], однако, точность в указанных работах достигалась увеличением

количества элементарных ячеек, завышающих массу и снижающих КПД. В данном случае, при реализации КИР, на интервале вынужденных колебаний, инвертор подает на последовательный LC-колебательный контур напряжение, равное разности входного и выходного напряжений, как и в структуре (рис. 1, а).

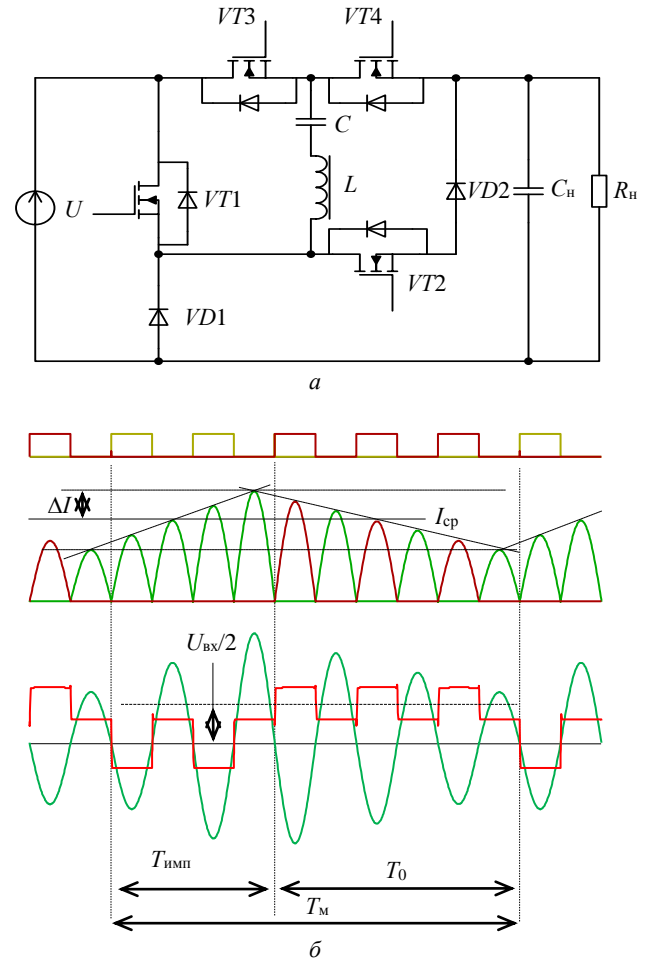


Рис. 2. Бестрансформаторный резонансный преобразователь с однополярным кодо-импульсным регулированием – а; б – диаграммы его работы при  $\gamma = 0,4$

На интервале свободных колебаний в преобразователе необходимо сформировать контур протекания тока в нагрузку без входного источника, что в данном случае реализуется выключением транзистора  $VT1$ , ток в этом случае протекает по цепи  $VD1-VT4$ . Энергия, запасенная в резонансном контуре, передается в нагрузку. Для блокирования отпирающего обратного диода транзистора  $VT2$  в схему вводится диод  $VD2$ . Таким образом, преобразователь обеспечивает КИР одной из диагоналей инвертора, т.е. однополярное КИР. Диаграммы работы преобразователя при регулировании приведены на рис. 2, б. Отличие бестрансформаторного преобразователя в том, что интервал затухания состоит из вынужденного полупериода и свободного, поэтому на контуре образуется постоянная составляющая  $U_{LC} = U_{вх}/2$ . В этом случае регулировочная примет вид

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot \frac{1+\gamma}{2}, \quad (1)$$

а пульсация амплитуды тока контура будет описываться уравнением

$$\Delta I = \frac{U_{\text{ВХ}}}{\rho} \cdot \gamma \cdot (1-\gamma) \cdot v, \quad (2)$$

показывающим, что такой преобразователь характеризуется в 2 раза меньшей амплитудой пульсаций, чем классический (см. рис. 1, а). При нормировании к амплитуде тока резонансного контура при  $\gamma = 1$

$$I_0 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{Н}}} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{АС}}},$$

где  $R_{\text{АС}}$  – активное сопротивление по переменному току.

$$\Delta I^* = \frac{\Delta I}{I_0} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{v}{Q} \cdot \gamma \cdot (1-\gamma) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\gamma \cdot (1-\gamma)}{Q_k}, \quad (3)$$

где  $Q_k = Q/v$  – добротность резонансного контура, соотношенная к кратности модуляции.

Среднее значение амплитуды тока резонансного контура

$$I_{\text{ср}}^* = \frac{I_{\text{ср}}}{I_0} = \frac{1+\gamma}{2}.$$

Зависимость пульсаций амплитуды тока резонансного контура от относительной длительности интервала вынужденных колебаний показана на рис. 3. Границу прерывистого режима можно обозначить равенством переменных и постоянной составляющих тока контура  $\Delta I^* = I_{\text{ср}}^*$ .

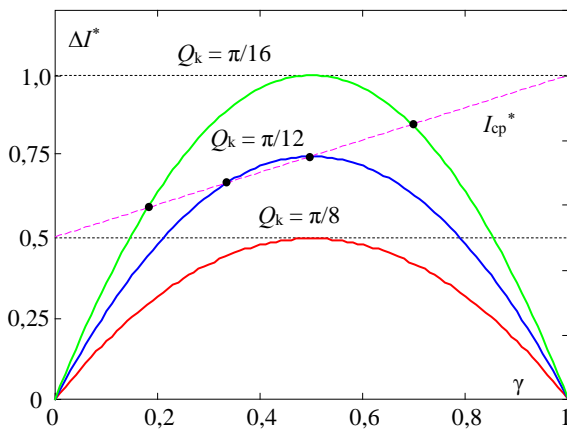


Рис. 3. Амплитуда пульсаций тока резонансного контура при разных добротностях

Следует сказать, что приведенные схемы преобразователей имеют линейный характер изменения амплитуды тока контура, который может описываться известными эквивалентными схемами со сглаживающим дросселем. В этом отношении резонансный преобразователь с однополярным регулированием эквивалентен понижающему преобразователю с неполной глубиной регулирования (рис. 4).

В таком преобразователе регулировочная характеристика также описывается (1), а пульсация тока – выражением

$$\Delta I = U_{\text{ВХ}} \cdot \gamma \cdot (1-\gamma) \cdot \frac{T_{\text{М}}}{2L},$$

которое эквивалентно полученному для резонансной схемы (2). Таким образом, анализ резонансных преобразователей постоянного напряжения можно проводить методом эквивалентной схемы понижающего преобразователя, сделав замену:

$$L_{\text{ЭКВ}} = \rho \cdot \frac{T_{\text{М}}}{4 \cdot v}. \quad (4)$$

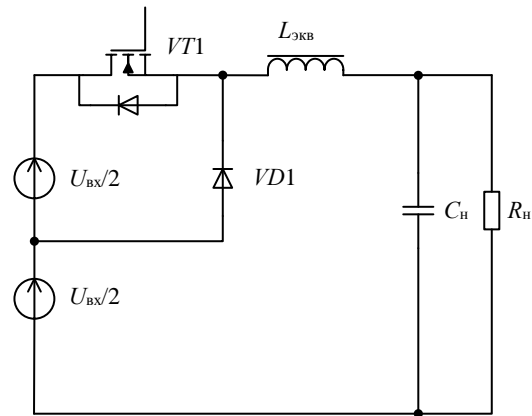


Рис. 4. Эквивалентная схема однополярного резонансного преобразователя с КИР

### Моделирование резонансного преобразователя с КИР в режиме заряда аккумулятора энергией солнечной батареи

В режиме заряда аккумулятора (АБ) энергией солнечной батареи (СБ) выходное напряжение фиксируется напряжением АБ, а входное напряжение, т.е. напряжение СБ, определяется регулировочной характеристикой (1), что позволяет задавать величину тока заряда АБ. Следует сказать, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) СБ имеет два характерных участка: участок стабильного тока и стабильного напряжения, понижающий характер регулирования диктует работу именно на ветви напряжения ВАХ СБ. Ветвь напряжения ВАХ СБ можно аппроксимировать линейной зависимостью, что имитируется последовательным соединением ЭДС и резистора, обеспечивающего нужный наклон ВАХ [15–19].

На ветви напряжения ВАХ СБ линейна и определяется выражением

$$I_{\text{СБ}} = \frac{U_{\text{ХХ}} - U_{\text{СБ}}}{R_{\text{Ш}}}, \quad (5)$$

где  $I_{\text{СБ}}$  – ток солнечной батареи;  $U_{\text{ХХ}}$  – напряжение холостого хода солнечной батареи;  $U_{\text{СБ}}$  – напряжение солнечной батареи;  $R_{\text{Ш}}$  – сопротивление резистора, обеспечивающего наклон ВАХ.

Тогда, с учетом (5), регулировочная характеристика зарядного тока АБ

$$I_{\text{АБ}} = \frac{U_{\text{ХХ}} - U_{\text{АБ}} \cdot \frac{2}{1+\gamma}}{R_{\text{Ш}}} \cdot \frac{2}{1+\gamma}.$$

Пульсация амплитуды тока контура

$$\Delta I = U_{\text{СБ}} \cdot \frac{\nu}{\rho} \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma),$$

$$\Delta I = 2U_{\text{АБ}} \cdot \frac{\nu}{\rho} \cdot \gamma \cdot \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma}.$$

В ходе исследования преобразователя была разработана имитационная модель резонансного преобразователя в среде Micro-Cap 11.0 (рис. 5, б). Аккумуляторная батарея имитировалась источником напряжения  $U_{\text{АБ}} = 50$  В, солнечная батарея – последовательным соединением источника напряжения  $U_{\text{ХХ}} = 100$  В и резистора  $R_{\text{ш}} = 10$  Ом, обеспечивающего наклон ветви напряжения ВАХ и максимальный зарядный ток при  $\gamma = 1$ , равный

$$I_{\text{АБ,м}} = \frac{U_{\text{ХХ}} - U_{\text{АБ}}}{R_{\text{ш}}} = 5,45 \text{ А}.$$

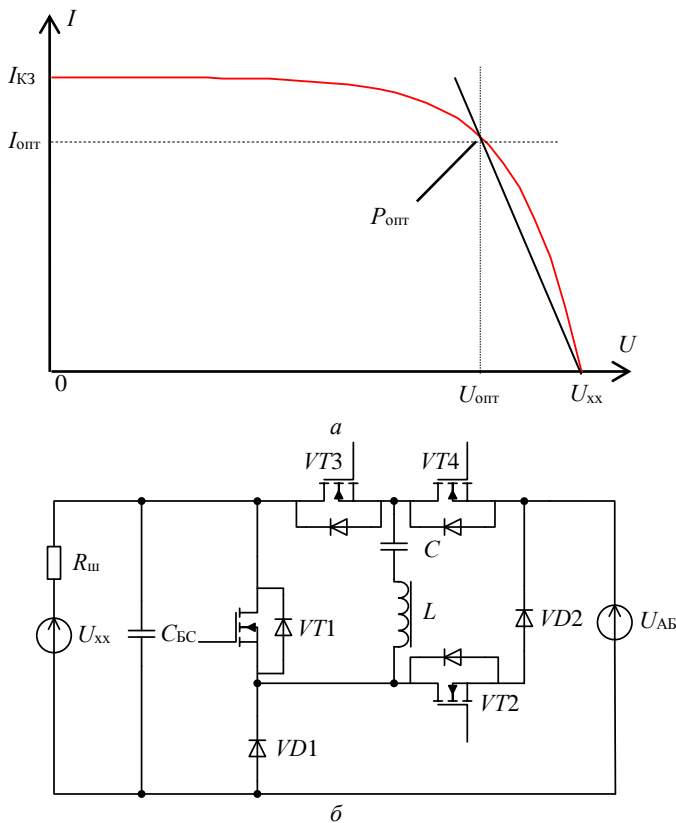


Рис. 5. ВАХ СБ – а; резонансный бестрансформаторный преобразователь в режиме заряда аккумулятора – б

Параметры резонансного контура  $L = 30$  мкГн,  $C = 84$  нФ обеспечивают резонансную частоту колебательного контура  $f = 100$  кГц и волновое сопротивление контура  $\rho = 20$  Ом.

Регулировочная характеристика в данном режиме нелинейна, что обусловлено наклоном ВАХ СБ. Максимальная пульсация тока резонансного контура соответствует  $\gamma = 0,4$ . Границей перехода в прерывистый режим тока резонансного контура при заданном можно считать кратность модуляции  $\nu = 4$ . Увеличение периода модуляции свыше  $\nu = 4$  нецелесообразно из-за перехода в режим прерывистого

тока, что приводит к неоправданному завышению габаритной мощности элементов резонансного контура.

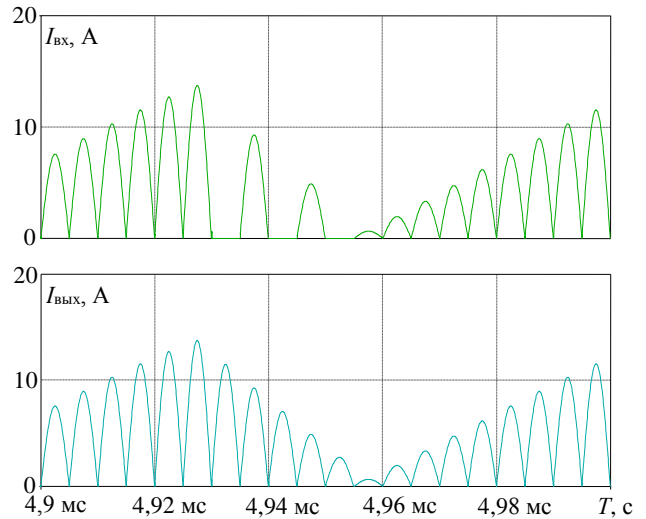


Рис. 6. Результаты моделирования на границе прерывистого режима при  $\nu = 8$ ,  $\gamma = 5/8$

В ходе работ были получены характеристики, приведенные на рис. 7.

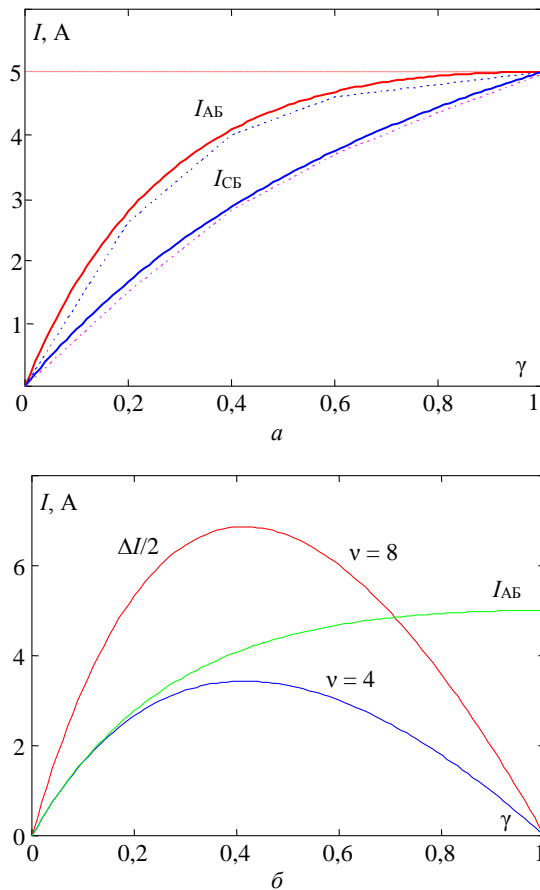


Рис. 7. Регулировочные характеристики в режиме заряда при  $U_{\text{ХХ}} = 100$  В,  $U_{\text{АБ}} = 50$  В – а; пульсация амплитуды тока резонансного контура в режиме заряда при  $U_{\text{ХХ}} = 100$  В,  $U_{\text{АБ}} = 50$  В – б

### **Заключение**

Кодо-импульсное регулирование в резонансных преобразователях постоянного напряжения характеризуется линейным изменением амплитуды тока, определяемым добротностью контура. Это позволяет применять для анализа таких преобразователей эквивалентные схемы непосредственных преобразователей.

Бестрансформаторный преобразователь обеспечивает регулирование одной полуволной, что ограничивает диапазон регулирования и уменьшает амплитуду пульсаций в 2 раза. КПД предложенного преобразователя снижают дополнительные диоды VD1, VD2, необходимые для формирования интервала свободных колебаний.

### *Литература*

1. Осипов А.В. Вольтодобавочный последовательный резонансный преобразователь с изменяемой структурой для систем электропитания / А.В. Осипов, Е.В. Ярославцев, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 3. – С. 27–37.
2. Осипов А.В. Последовательный резонансный преобразователь для систем электропитания от аккумуляторов / А.В. Осипов, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков, Е.В. Ярославцев, И.С. Шемолин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 103–110.
3. Земан С.К. Кодово-импульсный способ регулирования технологического параметра преобразователя частоты установки индукционного нагрева / С.К. Земан, О.Е. Сандырев // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 310, № 1. – С. 191–196.
4. Пат. 2 286 000 РФ, МПК Н 02 М 7/527. Способ управления резонансным инвертором со встречно-параллельными диодами / О.Е. Сандырев, С.К. Земан, Е.В. Ярославцев. – № 2 005 112 039 / 09, заявл. 21.04.2005; опубл. 20.10.2006, Бюл. № 29. – 7 с.
5. Пат. 2 319 282 РФ, МПК Н 02 М 7/527. Способ регулирования выходного напряжения преобразователя частоты / С.К. Земан, А.В. Осипов, О.Е. Сандырев. – № 2 006 141 429 / 09, заявл. 23.11.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7. – 10 с.
6. Multiport energy router for satellite based on high-frequency transformer / Kang Qing, Zhang Xuan, Xing Ji, Li Feng, Shi Haiping // European Space Power Conference. – 2019. – P. 305–308.
7. Cavalcante F.S. Design of a 5 kW high output voltage series-parallel resonant DC-DC converter / F.S. Cavalcante, J.W. Kolar // Proceedings of the 34th IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 2003. – Vol. 4. – P. 1807–1813.
8. Bidirectional dual active bridge series resonant converter with pulse modulation / Zoran Pavlovic, Jesus Oliver, Pedro Alou, Oscar Garcia, Jose Cobos // 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. – 2012. – P. 503–508.
9. Hillers A. Design of a highly efficient bidirectional isolated LLC resonant converter / A. Hillers, D. Christen, J. Biela // 15th International Power Electronics and Motion Control Conference. – 2012. – Vol. 13. – P. 1–8.
10. An AC-link bidirectional DC-DC converter with synchronous rectifier / Hirose Toshiro, Nishimura Keisuke, Kimura Takayuki, Matsuo Hirofumi // 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – 2010. – P. 351–357.

11. Dianbo Fu. Topology investigation and system optimization of resonant converter: PhD. – Virginia Polytechnic Institute and State University, 2010. 211 p.

12. Welday Gebremedihnn Gerekiel. Galvanic isolated bidirectional resonant converter DC-DC LLC: PhD. – Norwegian University of Science and Technology, 2014. 108 p.

13. Изолированные системы электроснабжения для объектов сельского хозяйства / Л.Г. Зотов, Ю.В. Ким, А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, И.И. Мулкібай // Актуальные проблемы современности. – 2015. – Т. 1. – С. 67–71.

14. Резонансные конвертеры постоянного тока на основе структур с переключаемыми конденсаторами для автономных систем / Л.Г. Зотов, А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, А.Н. Коновалова // Актуальные проблемы современности. – 2015. – Т. 3. – С. 88–91.

15. Power assessment indices of solar arrays under MPPT and DET methods for spacecraft / Zhang Xuan, Kang Qing, Yu Wentao, Xing Jie, Li Feng, You Xiangan // European Space Power Conference. – 2019. – P. 321–325.

16. Choudhary P.K. Implementation of soft-switching boost converter with a resonant circuit / P.K Choudhary, N. Gupta // International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research. – 2014. – Vol. 2, № 4. – P. 108–110.

17. Modeling and power management of a LEO small satellite electrical power system / E. Mostacciolo, L. Iannelli, S. Sagnelli, F. Vasca, R. Luisi, V. Stanzione // European Control Conference. – 2018. – P. 2738–2743.

18. Bhat A.K.S. Analysis and design of LCL-Type series resonant converter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1994. – Vol 41, № 1. – P. 118–124.

19. Schofield D. Design and implementation of a COTS, GaN-based power converter for spacecraft applications // European Space Power Conference. – 2019. – P. 314–317.

### **Осипов Александр Владимирович**

Канд. техн. наук, зав. лаб. каф. промышленной электроники (ПрЭ) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр., д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-44-75  
Эл. почта: ossan@mail.ru

### **Журавлев Иван Михайлович**

Аспирант каф. ПрЭ ТУСУР  
Тел.: +7-908-021-37-24  
Эл. почта: iv\_zhuravlev@mail.ru

Osipov A.V., Zhuravlev I.M.

### **Resonant DC-DC Converter with Code-pulse control**

Characteristics of DC-DC voltage converters with code-pulse regulation are considered. The transformerless resonant converter topology with one-pole code-pulse regulation, that implement regulation by half-wave resonance current, is proposed. Resonant circuit current amplitude dependence by regulation accuracy is established. Analysis method based on an equivalent circuit of a DC-DC buck converter is proposed. It is shown that accuracy increase leads to a rise of an amplitude of resonant circuit current.

**Keywords:** serial resonant converter, code-pulse regulation, transformerless topology.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-97-102

## References

1. Osipov A.V., Yaroslavtsev E.V., Burkin E.Y., Sviridov V.V. [Booster series resonant transformer with variable structure for power supply system's]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 27–37 (in Russ).
2. Osipov A.V., Shcolnyi V.N., Shinyakov Y.A., Yaroslavtsev E.V., Shemolin I.S. [Serial resonance converter for discharge of batteries space vehicles power system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 103–110 (in Russ).
3. Zeman S.K., Sandyrev O.E. [Code-pulse regulation method for technological parameter of the frequency converter of the induction heating installation]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Assets Engineering*, 2007, vol. 310, no. 1, pp. 191–196 (in Russ).
4. Sandyrev O.E., Zeman S.K., Yaroslavtsev E.V. *Sposob upravleniya rezonansnim invertorom so vstrechno-parallelnymi diodami* [Control method for resonance inverter with counter-parallel diodes]. Patent RF, no. 2286000, 2005 (in Russ).
5. Zeman S.K., Osipov A.V., Sandyrev O.E. *Sposob regulirovaniya vyhodnogo napraygeniya preobrazovatelja chastoti* [Output voltage regulation method for frequency converter]. Patent RF, no. 2319282, 2006 (in Russ).
6. Qing Kang, Xuan Zhang, Ji Xing, Feng Li, Hai-ping Shi. Multiport energy router for satellite based on high-frequency transformer. *European Space Power Conference*, 2019, pp. 305–308.
7. Cavalcante F.S., Kolar J.W. Design of a 5 kW high output voltage series-parallel resonant DC-DC converter. *Proceedings of the 34th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2003, vol. 4, pp. 1807–1813.
8. Pavlovic Zoran, Oliver Jesus, Alou Pedro, Garcia Oscar, Cobos Jose. Bidirectional dual active bridge series resonant converter with pulse modulation. *2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, 2012, pp. 503–508.
9. Hillers A., Christen D., Biela J. Design of a highly efficient bidirectional isolated LLC resonant converter. *15th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2012, vol. 13, pp. 1–8.
10. Hirose Toshiro, Nishimura Keisuke, Kimura Takayuki, Matsuo Hirofumi. An AC-link bidirectional DC-DC converter with synchronous rectifier. *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 351–357.
11. Dianbo Fu. *Topology investigation and system optimization of resonant converter*: PhD. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2010. 211 p.
12. Welay Gebremedihm Gerekiel. Galvanic isolated bi-directional resonant converter DC-DC LLC: PhD. – Norwegian University of Science and Technology, 2014. 108 p.
13. Zotov L.G., Kim Y.V., Mehtiev A.D., Yugay V.V., Mylkibay I.I. [Insulated power supply systems for objects of agriculture]. *Actual modern issue*, 2015, vol. 1, pp. 67–71 (in Russ).
14. Zotov L.G., Mehtiev A.D., Yugay V.V., Konovalova A.N. [Resonant converters DC structure-based switched-capacitor for autonomous systems]. *Actual modern issue*, 2015, vol. 3, pp. 88–91 (in Russ).
15. Xuan Zhang, Qing Kang, Wentao Yu, Jie Xing, Feng Li, Xiangyan You. Power assessment indices of solar arrays under MPPT and DET methods for spacecraft. *European Space Power Conference*, 2019, pp. 321–325.
16. Choudhary P.K., Gupta N. Implementation of soft-switching boost converter with a resonant circuit. *International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research*, 2014, vol 2, no. 4, pp. 108–110.
17. Mostacciolo E., Iannelli L., Sagnelli S., Vasca F., Luisi R., Stanzone V. Modeling and power management of a LEO small satellite electrical power system. *European Control Conference*, 2018, pp. 2738–2743.
18. Bhat A.K.S. Analysis and design of LCL-Type series resonant converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1994, vol/ 41, no. 1, pp. 118–124.
19. Schofield D. Design and implementation of a COTS, GaN-based power converter for spacecraft applications. *European Space Power Conference*, 2019, pp. 314–317.

**Aleksandr V. Osipov**

Candidate of Engineering Science, Head of laboratory,  
Tomsk State University of Control System  
and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-44-75  
Email: ossan@mail.ru

**Ivan M. Zhuravlev**

Postgraduate student TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-908-021-37-24  
Email: iv\_zhuravlev@mail.ru

УДК 629.783:064.5

П.В. Киселев, В.Г. Букреев, В.А. Гебгардт

## Моделирование передачи помехи от воздействия электростатического разряда через кабельную сеть космического аппарата

Целью проведенного исследования являлось уточнение модели кабельной сети, связывающей солнечную батарею с энергопреобразующей аппаратурой космического аппарата, в части передачи возмущающего воздействия от электростатического разряда. Произведена попытка рассмотрения кабельной сети в виде длинной линии. Проведено сравнение полученных результатов моделирования с результатами испытаний кабелей. Сформированы предложения по дальнейшему уточнению модели для возможности ее использования при изучении воздействия электростатического разряда на энергопреобразующую аппаратуру и бортовую аппаратуру космического аппарата.

**Ключевые слова:** космический аппарат, система электропитания, электростатический разряд, кабельная сеть, линия с распределенными параметрами.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-103-107

Взаимодействие заряженных частиц и солнечного излучения с элементами космического аппарата (КА) приводит к накоплению на их поверхности электрического заряда и обусловленного им электрического потенциала относительно окружающей плазмы. Даже в случае квазинейтральной плазмы, у которой концентрация электронов и ионов примерно одинакова, вследствие того, что скорость электронов намного больше скорости ионов, всегда создаются условия для электризации поверхности. Этим объясняется наличие на поверхности КА преимущественно отрицательного потенциала.

Разные участки поверхности КА могут заряжаться неодинаково из-за различных условий воздействия внешних факторов и из-за различий в электрофизических свойствах находящихся на них материалов. Происходит так называемый дифференциальный заряд, при котором между отдельными участками поверхности КА появляются электрические напряжения. В некоторых случаях возникающие на КА потенциалы могут измеряться киловольтами и могут приводить к электрическим разрядам на поверхности КА и солнечной батареи (СБ) [1–3].

Проведенный путем моделирования расчет переходных процессов токов и напряжений, возникающих в системе электропитания от возмущающего воздействия электростатического разряда на СБ, показал, что на вход шунтового стабилизатора (ШС) энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) через кабельную сеть проходит воздействие размахом до 2080 В (от –1880 до +200 В). Наибольшую часть воздействия на вход ЭПА принимают на себя входные диоды ШС ЭПА. Напряжение на входных диодах достигает 500 В в обратном направлении, что может привести к пробое диода [4].

Таким образом, возникло несоответствие, поскольку, с одной стороны, результаты моделирования показывают превышение допустимых параметров на элементах электрической схемы, но, с другой стороны, неизвестно об их сбоях и деградации по

причине воздействия электростатического разряда (ЭСР) в полете. Авторы высказывают предположение о том, что данное несоответствие может быть вызвано, во-первых, недостаточной точностью моделирования СЭП. Во-вторых, параметры ЭСР на поверхности СБ, приведенные в ГОСТ [5], могут быть существенно завышены. Так, в некоторых публикациях приведены другие параметры ЭСР, например в работах [6, 7].

Изучение данного несоответствия предлагается начать с уточнения модели такого важного элемента СЭП, как кабельная сеть, связывающая СБ и ЭПА.

### Структура модели кабельной сети

Значительная часть воздействия от ЭСР, возникающего между диэлектрическими поверхностями защитных стекол СБ и токопроводящими элементами КА или магнитосферной плазмой, поступает на элементы ЭПА через кабельную сеть. По этой причине предлагается в первую очередь выполнить уточнение модели кабельной сети.

Блок-схема системы электропитания КА (рассматривается одна секция СБ) показана на рис. 1.

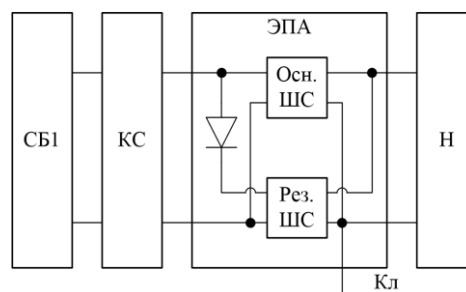


Рис. 1. Блок-схема системы электропитания КА (с одной секцией СБ): Кл – клемма заземления; КС – кабельная сеть; Н – нагрузка; Осн.ШС – основной канал ШС; Рез.ШС – резервный канал ШС; СБ1 – секция СБ

Силовые провода, по которым передается электрическая мощность от рассматриваемой секции СБ до ЭПА, входят в состав трех последовательно соединенных кабелей. Измеренная общая длина ка-



бельной линии как по плюсовой, так и по минусовой шинам составляет 18,1 м.

Кабельную сеть следует рассматривать как линию с распределенными параметрами, когда фаза сигнала за время распространения по ней меняется на  $90^\circ$  и более электрических градусов [8, 9]. Таким образом, в нашем случае длина  $\lambda$  волны должна быть не более  $18,1 \text{ м} \cdot 90^\circ / 360^\circ = 4,525 \text{ м}$ , что даже в свободном пространстве соответствует частоте распространения ( $f = c/\lambda$ ) не менее 66,3 МГц [10], где  $c$  – скорость света в вакууме.

Так как длительность импульса ЭСР может принимать значения от сотен наносекунд до единиц микросекунд, а длительность фронта – от 1 до 100 нс, то при разложении импульса в ряд Фурье ему будут соответствовать частоты основных гармоник (амплитудой не менее 1% по отношению к амплитуде ЭСР) в диапазоне от 5,2 МГц до 1,1 ГГц [4]. Поэтому кабельная сеть является длинной линией и для уточнения модели необходимо определить её погонные значения активного сопротивления, индуктивности, емкости и проводимости –  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$  и  $G_1$  соответственно.

Конфигурация проводов в трех кабелях, составляющих кабельную сборку, различная. Два кабеля имеют конфигурацию по 4 пары проводов сечением 0,2 и 0,32 мм<sup>2</sup> по шине «плюс» и шине «минус», один кабель – по 5 проводов сечением 0,5 мм<sup>2</sup> по шине «плюс» и шине «минус». Все провода МС 26-15 ТУ 16.К76-160-2000 [11] с жилами из медной посеребренной проволоки «БМС» или «МСр». Поэтому целесообразно было расчет волновых параметров производить для каждого кабеля отдельно.

Исходными данными для расчета параметров являлись осциллограммы тока и напряжения на входе кабелей, снятые при подаче синусоидального напряжения на вход кабелей и при холостом ходе (ХХ) и коротком замыкании (КЗ) на выходе кабелей. По полученным осциллограммам были определены комплексные сопротивления  $Z_{\text{ХХ}}$  и  $Z_{\text{КЗ}}$ .

Произведенный расчет показан в формулах (1)–(9) [10]:

$$Z_B = \sqrt{Z_{\text{ХХ}} \cdot Z_{\text{КЗ}}}, \quad (1)$$

$$\text{th}(\gamma \cdot l_{\text{каб}}) = \sqrt{Z_{\text{КЗ}} / Z_{\text{ХХ}}}, \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot l_{\text{каб}}} \cdot \ln \left( \frac{1 + \text{th}(\gamma \cdot l_{\text{каб}})}{1 - \text{th}(\gamma \cdot l_{\text{каб}})} \right), \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{2 \cdot l_{\text{каб}}} \cdot \left[ \arg \left( \frac{1 + \text{th}(\gamma \cdot l_{\text{каб}})}{1 - \text{th}(\gamma \cdot l_{\text{каб}})} \right) + 2\pi \cdot n \right], \quad (4)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (5)$$

$$R_1 = \text{Re}(\gamma \cdot Z_B), \quad (6)$$

$$L_1 = \text{Im}(\gamma \cdot Z_B) / \omega, \quad (7)$$

$$G_1 = \text{Re}(\gamma / Z_B), \quad (8)$$

$$C_1 = \text{Im}(\gamma / Z_B) / \omega. \quad (9)$$

Рассчитанные таким способом параметры  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $G_1$  являются элементами схемы участка цепи, показанной на рис. 2.

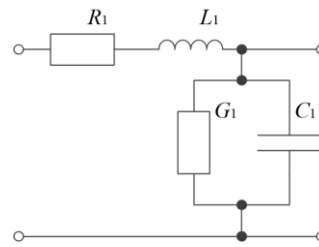


Рис. 2. Схема участка цепи

Но такой структуры недостаточно для получения адекватной модели кабельной сети.

Во-первых, для определения влияния ЭСР на элементы электрической схемы СЭП и расчета переходных процессов, занимающих время от сотен наносекунд до единиц микросекунд, необходимо привести модель к симметричному виду как по плюсу и минусу, так и по входу и выходу.

Во-вторых, кабельная сеть представляет собой жгут проводов, в котором близко друг с другом расположены как провода плюсовой, так и минусовой цепей. Если амплитуда и фаза токов, протекающих в противоположных направлениях по плюсовым и минусовым проводам, равны, то магнитные поля компенсируются. В противном случае в близкорасположенном проводе начинает возникать ЭДС [12]. Данная связь может оказать существенное влияние на переходные процессы.

ЭСР в точке воздействия вызывает нескомпенсированный отрицательный заряд. Возникают разность потенциалов до 20 кВ и сильное электрическое поле [5]. Отрицательный заряд начинает растекаться по всем токопроводящим элементам в направлении более высоких потенциалов. Поэтому при ЭСР в токопроводящие элементы КА, гальванически связанные к корпусом КА через магнитосферную плазму (рис. 3), токи плюсовой и минусовой шин кабельной сети будут неодинаковыми.

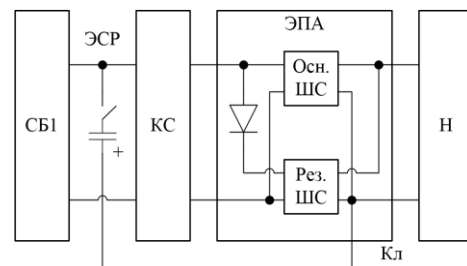
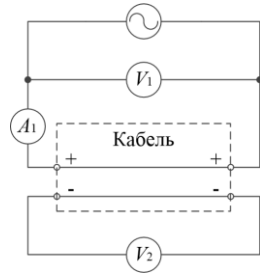


Рис. 3. Точка воздействия ЭСР: Кл – клемма заземления; КС – кабельная сеть; Н – нагрузка; Осн.ШС – основной канал ШС; Рез.ШС – резервный канал ШС; СБ1 – секция СБ; ЭСР – точка воздействия ЭСР

По этой причине в структуру, показанную на рис. 2, была введена магнитная связь между плюсовой и минусовой шинами кабельной линии. Исходные данные для расчета коэффициента магнитной связи для каждого кабеля были определены экспериментально в соответствии со схемой, показанной на рис. 4.

Рис. 4. Схема измерения параметров для расчета магнитной связи



где  $M$  – магнитная связь между индуктивностями плюсовой и минусовой шины кабеля;  $U_2$  – действующее значение напряжения между входом и выходом минусовой цепи;  $\omega$  – угловая частота источника напряжения;  $I_1$  – действующее значение тока в плюсовой цепи при подключении к ее входу и выходу источника синусоидального напряжения;  $l_{\text{каб}}$  – длина кабеля;  $L_1$  – погонное значение индуктивности кабеля.

Величина коэффициента магнитной связи  $k$  была определена по формулам (10) и (11):

$$M = U_2 / (\omega \cdot I_1), \tag{10}$$

$$k = \frac{M}{l_{\text{каб}} \cdot \sqrt{\frac{L_1 \cdot L_1}{2} \cdot \frac{L_1}{2}}} = \frac{2 \cdot M}{l_{\text{каб}} \cdot L_1}, \tag{11}$$

Значение коэффициента магнитной связи для разных кабелей ожидаемо оказалось высоким и составило от 0,85 до 0,9.

Использованная при расчетах схема замещения линии с распределенными параметрами показана на рис. 5.

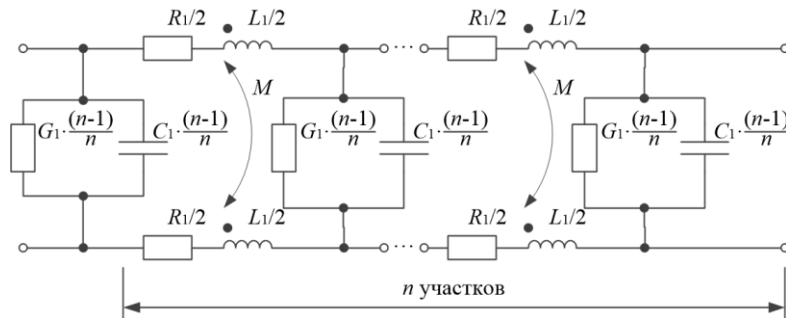
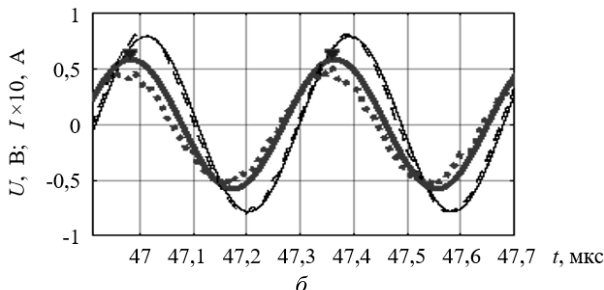
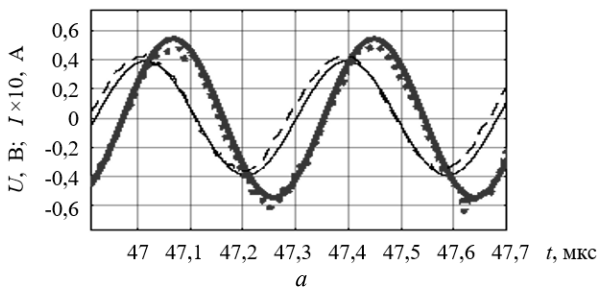


Рис. 5. Использованная при расчетах схема замещения линии с распределенными параметрами

**Сравнение результатов моделирования и испытаний**

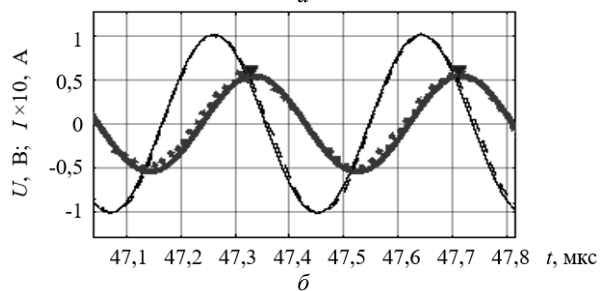
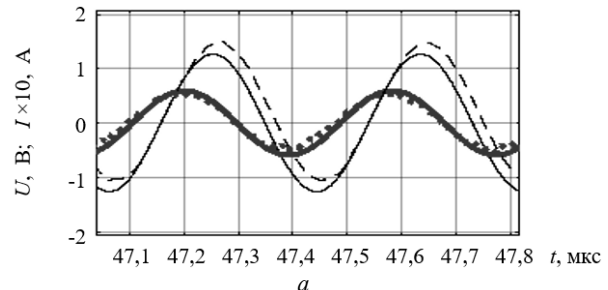
Приведем результаты моделирования и сравним их с результатами испытаний (рис. 6 и 7).



Пунктирные линии – экспериментальные данные; сплошные линии – данные моделирования; тонкие линии – напряжение; жирные линии – ток

Рис. 6. Результаты моделирования передачи синусоидального напряжения и тока по кабелю длиной 10,23 м с конфигурацией по 4 пары проводов сечением 0,2 и 0,32 мм<sup>2</sup> по шине «плюс» и шине «минус» на частоте 2,621 МГц.

Разбивка на 100 одинаковых участков: а – при ХХ на выходе кабеля; б – при КЗ на выходе кабеля



Пунктирные линии – экспериментальные данные; сплошные линии – данные моделирования; тонкие линии – напряжение; жирные линии – ток

Рис. 7. Результаты моделирования передачи синусоидального напряжения и тока по кабелю длиной 5,62 м с конфигурацией по 5 проводов сечением 0,5 мм<sup>2</sup> по шине «плюс» и шине «минус» на частоте 2,629 МГц. Разбивка на 60 одинаковых участков: а – при ХХ на выходе кабеля; б – при КЗ на выходе кабеля

Модель кабельной линии, состоящей из участков длиной около 10 см, позволяет достаточно точно описать объект исследования при определении амплитуды и фазы переменного напряжения и тока относительно поданного на вход напряжения. При

сравнении результатов моделирования с аппроксимированными синусоидой результатами испытаний (при исключении высокочастотных помех) для кабельной линии длиной 10,23 м абсолютная ошибка по значению входного тока в режиме ХХ и КЗ составляет не более 5,2 и 9,9 мА соответственно при амплитуде тока 54,4 и 58 мА соответственно (см. рис. 6). Для кабельной линии длиной 5,62 м абсолютная ошибка по значению входного тока в режиме ХХ и КЗ составляет не более 10,6 и 6,5 мА соответственно при амплитуде тока 59 и 54,4 мА соответственно (см. рис. 7).

В то же время уменьшение длины участков до 1 см, с одной стороны, не приводит к значительному повышению точности моделирования, но с другой стороны, значительно увеличивает сложность и длительность вычислений. По этой причине на данном этапе исследований целесообразно остановиться на участках длиной 10 см с возможностью пересмотра данного значения при проведении верификации модели СЭП.

Следует отметить, что модель с определенными значениями  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $G_1$  и с приведенными уточнениями структуры будет с высокой точностью описывать объект только в частном случае: при той частоте, при которой были получены исходные данные для расчета.

Одним из факторов этого является то, что на частотах выше единиц мегагерц из-за скин-эффекта и эффекта близости токи и магнитные поля распределены по сечению проводников неоднородно [13–15]. По этой причине  $R_1$  и  $L_1$  будут иметь зависимость от частоты источника напряжения, которую необходимо определить.

#### Выводы и рекомендации

Разработанная модель имеет высокую точность в части описывания кабельной сети в части амплитуды и фазы переменного тока относительно поданного на вход кабелей напряжения. Но это справедливо только при моделировании на частоте, при которой были получены исходные данные для расчета параметров модели. Поскольку цель разрабатываемой модели СЭП – исследование передачи воздействия от ЭСР, которому соответствуют гармоники от единиц мегагерц до единиц гигагерц, модель кабельной сети нуждается в доработке.

Следующим шагом по уточнению модели должен быть расчет сопротивления и индуктивности биметаллических проводов, из которых сделаны кабели, на основе распределения плотности тока по сечению. Наиболее целесообразным вариантом представляется провести расчет при разных частотах источника напряжения и сформировать зависимости  $R_1(\omega)$  и  $L_1(\omega)$ .

#### Литература

1. Акишин А.И. Электризация космических аппаратов / А.И. Акишин, Л.С. Новиков. – М.: Знание, 1985. – 64 с.
2. Модель космоса: в 2 т. / под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КДУ, 2007. – 1144 с.
3. Акишин А.И. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов / А.И. Акишин,

Л.С. Новиков // Новое в жизни, науке, технике. Сер.: Космонавтика, астрономия. – М.: Знание, 1983. – № 4. – 64 с.

4. Киселев П.В. Моделирование работы электрической схемы системы электропитания космического аппарата для расчета переходных процессов токов и напряжений при воздействии электростатического разряда // Электронные и электромеханические системы и устройства: XIX науч.-техн. конф. (Томск, 16–17 апр. 2015 г.), АО «НПП «Полус». – 2015. – С. 255–257.

5. ГОСТ Р 56515–2015. Аппараты космические автоматические и системы бортовые служебные космических аппаратов. Общие требования по защищенности и стойкости к воздействию электрофизических факторов космического пространства и статического электричества. – Введ. 2015-07-08. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.

6. Inguibert V. Flashover measurement on a solar array – re-adults of EMAGS3 experimental campaign / V. Inguibert, P. Sarrailh, D. Sarraill, C. Baur, D. Payan, A. Gerhard, B. Boulanger, P. Pelissou, C. Wuersching // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, No. 12. – P. 3370–3379.

7. Ferguson D.C. Flashover Current Pulse Formation and the Perimeter Theory / D.C. Ferguson, V. B. Vayner. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, No. 12. – P. 3393–3401.

8. Kuphaldt T.R. Lessons In Electric Circuits. Vol. 2. AC: study guide. – 2007. – 556 p. – Режим доступа: <http://bookfi.net/dl/616896/e7ee66>, свободный (дата обращения: 01.04.2020).

9. Теория длинных линий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.radiouniverse.ru/book/lyubitelskie-antenny-korotkih-i-ultrakorotkih-voln/teoriya-dlinnyh-linij>, свободный (дата обращения: 01.04.2020).

10. Черкашин М.В. Линии передачи и согласующие цепи для СВЧ МИС. Модуль 5. Проектирование и моделирование СВЧ МИС, а также технологических процессов их производства: учеб. пособие / М.В. Черкашин, Л.И. Бабак. – Томск: ТУСУР, 2010. – 54 с.

11. Провода монтажные с полиимидной изоляцией марок МС 26-15, МСЭ 26-15, МСЭО 26-15. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://optochip.org/vniikp/4/1/2/TU16.K76-160-2000>, свободный (дата обращения: 01.04.2020).

12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 11-е изд. – М.: Гардарики, 2007. – 701 с.

13. Бакалов В.П. Основы теории цепей: учеб. пособие / В.П. Бакалов, Б.И. Дмитриков, Б.И. Крук. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 597 с.

14. Власов А.А. Макроскопическая электродинамика: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2005. – 240 с.

15. Вишняков Е.М., Хвостов Д.В. Расчет индуктивности многопроволочных кабельных жил в программной среде ELCUT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.ruscable.ru/article/Raschyot\\_induktivnosti\\_mnogoprovolochnyx\\_kabelnyx/](https://www.ruscable.ru/article/Raschyot_induktivnosti_mnogoprovolochnyx_kabelnyx/), свободный (дата обращения: 01.04.2020).

#### Киселев Павел Валерьевич

Инженер-конструктор АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева, аспирант инженерной школы энергетики (ИШЭ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина ул., д. 52, г. Железногорск Красноярского края, Россия, 662972  
Тел.: +7-923-332-80-52  
Эл. почта: kiselev.home@yandex.ru

**Букреев Виктор Григорьевич**

Д-р техн. наук, профессор ИШЭ НИ ТПУ  
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-854-21-96  
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

**Гебгардт Виктор Александрович**

Инженер-конструктор АО «Информационные  
спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева,  
Ленина ул., д.52, г. Железногорск Красноярского края,  
Россия, 662972  
Тел.: +7-923-401-51-45  
Эл. почта: gebgardt33@mail.ru

Kiselev P.V., Bukreev V.G., Gebgardt V.A.

**Modeling of electrostatic discharge impact transmitting through spacecraft cabling**

The aim of this research was to detail the cabling model from solar array to electrical power convert equipment of the spacecraft in terms of electrostatic discharge impact transmitting. Detailed cabling model is the part of power-supply system model that will be used for electrostatic discharge impact on spacecraft on-board equipment analysis.

**Keywords:** Spacecraft, power-supply system, electrostatic discharge, cabling, distributed parameter line  
**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-103-107

*References*

1. Akishin A.I., Novikov L.S.: *Elektrizatsiya kosmicheskikh apparatov* [Electrification of spacecrafts]. Moscow, Znaniye Publ., 1985. 64 p. (In Russ.).
2. Panasyuk M.I., Novikov L.S.: *Model kosmosa* [The Space Model]. In 2 vol. Ed. M.I. Panasyuk, L.S. Novikov. Vol. 2. [The impact of the space environment on materials and equipment of spacecraft]. Moscow, KDU Publ., 2007. 1144 p. (In Russ.).
3. Akishin A.I., Novikov L.S.: *Vozdeystviye okruzhayushchey sredy na materialy kosmicheskikh apparatov* [The environmental impact on the materials of spacecraft]. Moscow, Znaniye Publ., 1983. 64 p. (In Russ.).
4. Kiselev P.V.: *Modelirovaniye raboty elektricheskoy skhemy sistemy elektropitaniya kosmicheskogo apparata dlya rascheta perekhodnykh protsessov tokov i napryazheniy pri vozdeystvii elektrostaticheskogo razryada* [The spacecraft power supply system characteristics modeling under the electrostatic discharges for currents and voltages transients calculating]. Elektronniye i elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva: XIX nauchno-tehnicheskaya konferentsiya [Electronic and electromechanical systems and devices: XIX scientific-tech. conf.]. Tomsk, JSC Scientific and Production Center Polyus Publ., 2015. 360 p. (In Russ.).
5. GOST R 56515-2015: *Apparaty kosmicheskoye avtomaticheskoye i sistemy bortovoye sluzhebniye kosmicheskikh apparatov. Obshchiye trebovaniya po zashchishchennosti i stoykosti k vozdeystviyu elektrophizicheskikh faktorov kosmicheskogo prostranstva i staticheskogo elektricheskogo* [Automatic spacecrafts and spacecraft platform onboard systems. General requirements for protection and resistance to the outer space and static electricity electrophysical effects]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 20 p. (In Russ.).
6. Inguibert V., Sarraillh P., Sarraillh D., Baur C., Payan D., Gerhard A., Boulanger B., Pelissou P., Wuersching C. Flashover measurement on a solar array – re-adults of EMAGS3 experimental campaign. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, vol. 41, no. 12, pp. 3370–3379.

7. Dale C. Ferguson, Boris V. Vayner. Flashover Current Pulse Formation and the Perimeter Theory. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, vol. 41, no. 12, pp. 3393–3401.

8. Kuphaldt T.R. Lessons In Electric Circuits. Volume 2. AC: study guide, 2007. 556 p. Available at: <http://bookfi.net/dl/616896/e7ee66> (Accessed: April 1, 2020).

9. *Teoriya dlinnikh liniy* [Long line theory]. Available at: <http://bookfi.net/dl/616896/e7ee66> (Accessed: April 1, 2020).

10. Cherkashin M.V., Babak L.I.: *Linii peredachi i soglasuyushch iye tsepi dlya SVCh MIS. Modul 5. Proyektirovaniye i modelirovaniye SVCh MIS, a tagzhe tekhnologicheskikh protsessov ih proizvodstva* [Transmission lines and matching circuits for microwave MIS. Module 5. Design and simulation of microwave MIS, and technological processes for their production]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2010. 54 p. (In Russ.).

11. *Provoda montazhniye s poliimidnoy izolyatsiyey marok MS 26-15, MSE 26-15, MSEO 26-15. Tekhnicheskkiye usloviya* [MS 26-15, MSE 26-15, MSEO 26-15 assembly wire models with polyimide insulation. Specification] Available at: <https://optochip.org/vniikp/4/1/2/TY16.K76-160-2000> (Accessed: April 1, 2020) (In Russ.).

12. Bessonov L.A.: *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. Elektricheskkiye tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow, Gardariki Publ., 2007. 701 p. (In Russ.).

13. Bakalov V.P., Dmitrikov B.I., Kruk B.I.: *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuit theory]. Moscow, Goryachaya liniya – Telecom Publ., 2007. 597 p. (In Russ.).

14. Vlasov A.A.: *Macrosopicheskaya elektrodinamika* [Macroscopic electrodynamicst]. Moscow, FIZMAT-LIT Publ., 2005. 240 p. (In Russ.).

15. Vishnyakov E.M., Khvostov D.V.: *Rashchet induktivnosti mnogoprovolochnykh kabelnykh zhil v programmnoy srede ELCUT* [Multi-wire cable cores inductance calculation in the ELCUT software environment]. Available at: [https://www.ruscable.ru/article/Raschyot\\_induktivnosti\\_mnogoprovolochnyx\\_kabelnyx/](https://www.ruscable.ru/article/Raschyot_induktivnosti_mnogoprovolochnyx_kabelnyx/) (Accessed: April 1, 2020).

**Pavel V. Kiselev**

Engineer-designer of Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems, Postgraduate student, Engineering School of Energy, National Research Tomsk Polytechnic University (NI TPU)  
52, Lenin pr., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk reg., Russia, 662972  
Phone: +7-923-332-80-52  
Email: kiselev.home@yandex.ru

**Victor G. Bukreev**

Doctor of Engineering Sciences, Professor NI TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-854-21-96  
Email: bukreev@tpu.ru

**Viktor A. Gebgardt**

Engineer-designer of Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin st., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk reg., Russia, 662972  
Phone: +7-923-401-51-45  
Email: gebgardt33@mail.ru

УДК 621.311.6

О.Г. Рекутов, А.Г. Юдинцев

## Анализ способов построения имитаторов солнечных батарей для физического моделирования систем электроснабжения космических аппаратов

Приводится классификация имитаторов батареи солнечной. Согласно классификационным признакам проводится анализ различных топологий построения силового модуля и систем управления. В основе описанных топологий силовых модулей лежат линейный или импульсный принципы работы. Описанные системы управления в своей основе имеют аналоговый или цифровой принцип работы. При этом проектирование имитаторов батареи солнечной предполагает возможность комбинировать в различных вариациях принципы работы силовых модулей и систем управления. Освещены тенденции и перспективы развития, базирующиеся на требованиях динамических или мощностных характеристик.

**Ключевые слова:** система электропитания, имитатор солнечной батареи, силовой модуль, широтно-импульсная модуляция, система управления.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-108-115

Подавляющее большинство спутников в качестве источника электроэнергии для аппаратуры и оборудования используют солнечные батареи (СБ). От работы СБ спутника напрямую зависят его эффективность и срок службы. Важное значение имеют наземные испытания системы электропитания (СЭП) спутника для подтверждения ее эффективности и надежности. Однако использование при наземных испытаниях реальных СБ неэффективно и потому нецелесообразно. Решением данной проблемы является использование имитаторов солнечной батареи (ИСБ). Основной задачей ИСБ является обеспечение питанием каждой подсистемы спутника на протяжении всего периода наземных испытаний [1, 2].

### Классификация ИСБ

Мировая космическая и промышленная индустрия предлагает различные варианты построения ИСБ. В целом при разработке ИСБ учитываются три

аспекта: принцип работы силового модуля (СМ), тип системы управления по принципу представления информации и структура задающего устройства (ЗУ). С учетом данных аспектов классификацию можно представить в виде блок-схемы, показанной на рис. 1.

СМ по принципу работы главным образом разделяются на линейные и импульсные. ИСБ, выполненные с использованием СМ с линейным принципом работы, имеют отличные динамические характеристики. Однако линейная топология СМ имеет ограничения, связанные со сложностью реализации высоких показателей мощности, малым КПД, большим тепловыделением и большими размерами, в связи с чем не подходит для использования в создаваемых на ее основе ИСБ большой мощности. Для создания ИСБ большей мощности используется топология на основе импульсного принципа работы.

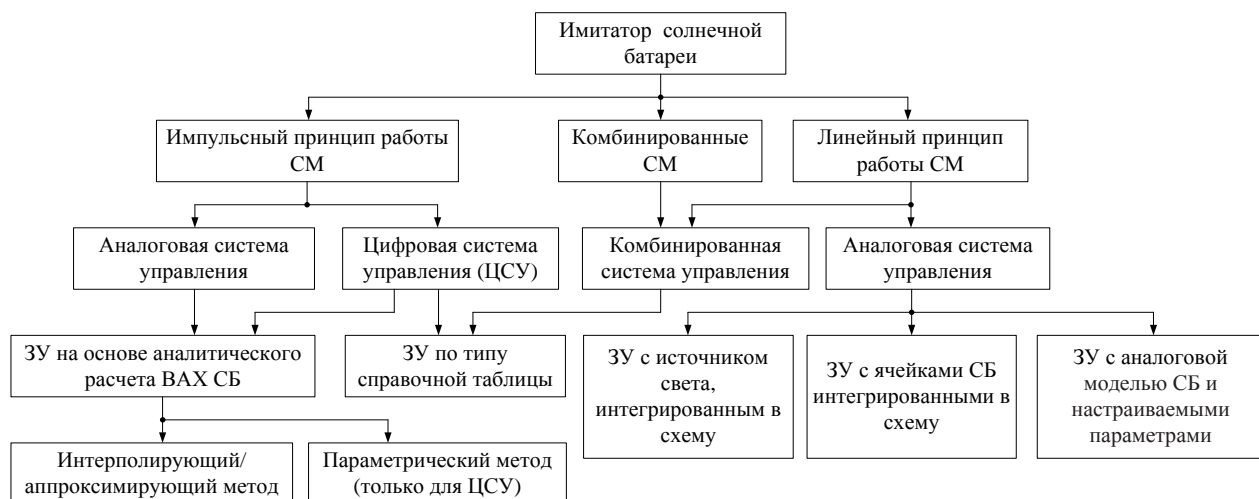


Рис. 1. Классификация ИСБ

По типу обработки информации системы управления классифицируются на аналоговые и цифровые. ИСБ с аналоговой системой управления, изображенной на рис. 2, отличаются простотой и относительно

невысокой стоимостью. Такая система управления имеет два контура регулирования: внутренний (токовый) и внешний (задающий уставку). Внутренний контур, как правило, регулирует ток выхода ИСБ. В

ИСБ с аналоговой системой управления в качестве ЗУ во внешнем контуре регулирования могут применяться:

- небольшая ячейка СБ с источником света;
- фотодиод в паре со светодиодом;
- аналоговая модель СБ.

Такой подход позволяет осуществлять имитацию работы СБ в реальном времени (с минимальными задержками). Следовательно, увеличивается точность воспроизведения ВАХ в сравнении с другими методами. Уставка от аналогового контура регулирования хорошо контролируема. Следовательно, можно эффективно и достаточно гибко имитировать

ВАХ СБ при изменении окружающих условий, таких как солнечное излучение и температура.

Альтернативой аналоговой системы управления является цифровая. Использование цифровой системы управления для построения ВАХ ИСБ придает большую гибкость управления и надежность, также цифровая система меньше подвержена влиянию высокочастотных помех. Недостатком цифровой системы управления является цифровая задержка, связанная с таким недостатком, как ограничение частоты квантования. На рис. 3 показана структурная схема типовой цифровой системы управления ИСБ.

Цифровые системы управления, применяемые в ИСБ, строятся двумя способами.

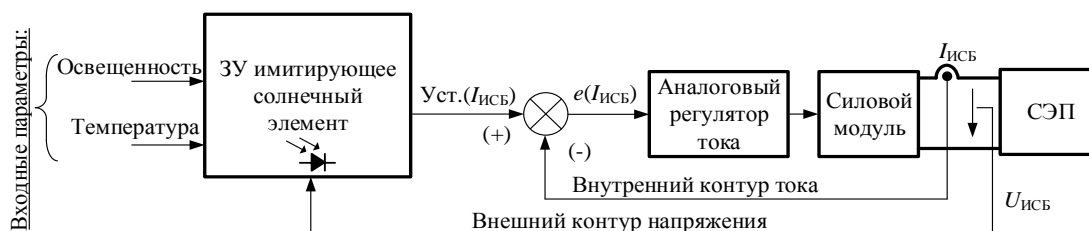


Рис. 2. Структурная схема типовой аналоговой системы управления ИСБ

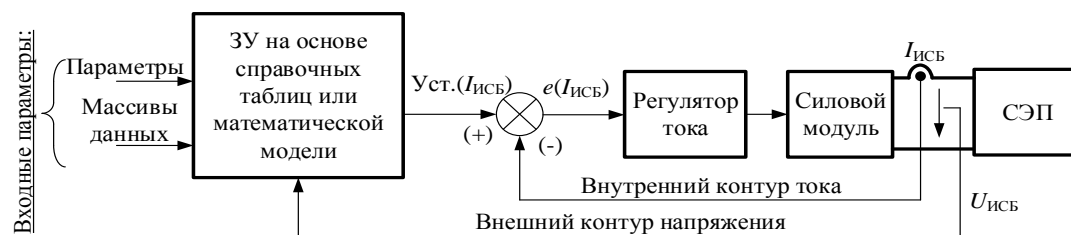


Рис. 3. Структурная схема типовой цифровой системы управления ИСБ

В качестве первого способа применяется так называемый метод справочных таблиц. Данный метод предполагает использование большого массива данных измеренных значений тока и напряжения ВАХ конкретной СБ, хранимого в модуле памяти цифровой системы управления. Чем больше объем этих данных, тем выше точность воспроизведения ВАХ СБ.

Во втором способе используется ЗУ на основе аналитического расчета ВАХ СБ, использующая логарифмические вычисления. Наиболее часто встречающиеся модели с экспоненциальной формулой – это параметрическая модель СБ и модель СБ на основе интерполяции. Для параметрической модели при расчетах используются параметры ячеек СБ из их документации. При использовании модели СБ на основе интерполяции необходимо знать напряжение холостого хода (ХХ), ток короткого замыкания (КЗ), напряжение и ток точки максимального отбора мощности или оптимальной рабочей точки (ОРТ) ( $U_{орт}$  и  $I_{орт}$ ) [3]. Данный способ также может применяться для построения аналоговых систем управления за исключением параметрического метода.

**ИСБ с импульсным принципом работы СМ**

В литературе [4–6] приводятся ИСБ с импульсной топологией СМ и цифровой системой управления с ЗУ по типу справочной таблицы. На рис. 4 изображена функциональная схема подобного ИСБ.

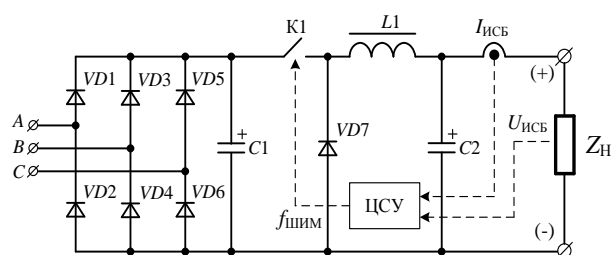


Рис. 4. Функциональная схема ИСБ с импульсной топологией СМ и цифровой системой управления

СМ ИСБ включает в себя трехфазный мостовой выпрямитель и понижающий преобразователь. ЦСУ состоит из DSP-микроконтроллера и периферии, включающей в себя схемы управления силовой частью (драйверы с гальванической развязкой), АЦП, модули интерфейса. В качестве эквивалентной схемы солнечного элемента (СЭ) принята однодиодная идеализированная модель (рис. 5), описываемая уравнением (1) [7]:

$$\begin{aligned}
 I_H &= I_{КЗ} - I_D, \\
 I_D &= I_S \cdot (\exp^{eU/kT} - 1), \\
 I_H &= I_{КЗ} - I_S \cdot (\exp^{eU/kT} - 1),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $I_H$  – ток нагрузки солнечного элемента;  $I_{КЗ}$  – фототок или ток короткого замыкания солнечного элемента;  $I_D$  – ток, протекающий через идеализированный диод.

зированный  $p-n$ -переход;  $I_s$  – обратный ток насыщения;  $e$  – заряд электрона, равный  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $U$  – напряжение на нагрузке солнечного элемента;  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – рабочая температура в градусах Кельвина.

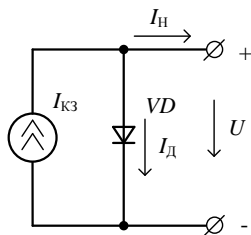


Рис. 5. Эквивалентная идеализированная модель солнечного элемента

Для имитации ВАХ СБ имитатор должен работать в определенной точке, в которой напряжение и ток выхода понижающего преобразователя должны соответствовать пересечению нагрузочной характеристики и ВАХ СБ. Данная точка является рабочей точкой. Для реализации данного условия используется метод справочных таблиц, согласно которому в память микроконтроллера заносятся значения напряжения и тока конкретной ВАХ СБ. Хранимые значения представляют собой массив данных, структурированных определенным образом, при котором каждому значению напряжения соответствует определенное значение тока.

На рис. 6 изображена типичная ВАХ СБ. Имитатор работает в точке пересечения имитируемой ВАХ СБ и нагрузочной характеристики. В качестве примера рассмотрена резистивная нагрузка, изменяющаяся от значения  $R_1$  до  $R_2$  и от  $R_2$  до  $R_3$ . Вслед за изменением нагрузки меняет свое положение и рабочая точка, следуя из положений от 1 к 2 и от 2 к 3.

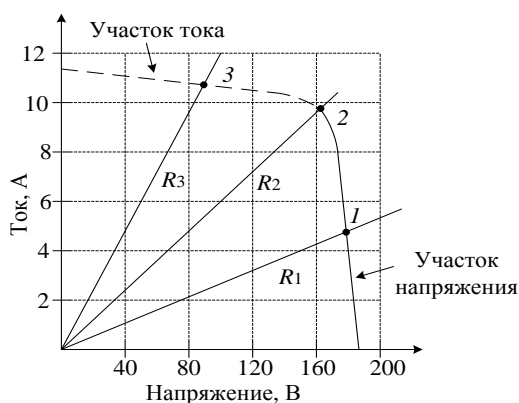


Рис. 6. ВАХ СБ и нагрузочные характеристики

В некоторых случаях, в контексте данного способа управления, применяют принципы управления (регулирования) только по напряжению или только по току.

Принцип регулирования по напряжению работает следующим образом.

Измеряется величина выходного тока ИСБ, по таблице данных определяется соответствующее значение уставки напряжения, далее регулятор меняет

величину скважности ШИМ, чтобы получить заданное напряжение выхода ИСБ.

Аналогично работает принцип регулирования по току. Измеряется величина выходного напряжения ИСБ, по таблице данных определяется соответствующее значение уставки тока, далее регулятор меняет величину скважности ШИМ, чтобы получить заданный ток выхода ИСБ.

Однако СБ представляет собой нелинейный источник энергии, который может быть представлен как источник тока и источник напряжения, где в каждом случае величины тока и напряжения меняются в относительно небольшом диапазоне для соответствующих участков ВАХ. Как показано на рис. 6, напряжение на участке тока меняется в диапазоне 0–160 В, в то время как ток меняется в диапазоне всего лишь 1,5 А. В случае использования только принципа управления по напряжению на практике будет сложно измерить значение тока выхода таким образом, чтобы достаточно точно получить значение уставки по напряжению из справочной таблицы. Предсказуемо подобная проблема возникнет на участке напряжения в случае использования только принципа управления по току. Как следствие, применение только одного из принципов управления не может дать достаточно точной имитации работы СБ. С учетом данного обстоятельства применяются два принципа в зависимости от участка ВАХ.

Так как принципы управления аналогичны, будет рассмотрен только принцип управления по напряжению. На рис. 7 в масштабе изображен фрагмент ВАХ ИСБ (линия  $K_{PV}$ ) и нагрузочной характеристики (линия  $K_R$ ), изменяющейся от значения  $R_1$  до  $R_2$ . Последовательность перехода рабочей точки при изменении нагрузки показана стрелками.

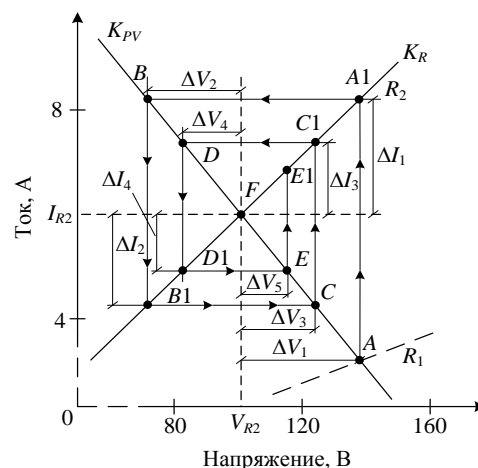


Рис. 7. Фрагмент ВАХ СБ и нагрузочной характеристики

Предположим, изначально ИСБ работал в точке  $A$  при изменении нагрузки от значения  $R_1$  до  $R_2$ , рабочая точка ИСБ переходит в положение  $A1$ . Это обусловлено наличием конденсатора  $C1$  на выходе СМ, что не позволяет изменить значение выходного напряжения мгновенно.

В точке  $A1$  в соответствии с принципом управления измеряется значение тока  $I_{R2} + \Delta I_1$  и в качестве

значения уставки напряжения из справочной таблицы выбирается значение, соответствующее величине напряжения выхода  $V_{R2} - \Delta V_2$  (точка B). Реальная рабочая точка переместится в точку B1. С каждой итерацией рабочая точка будет приближаться к истинному значению – точке F. Ход итераций можно условным образом выразить логической последовательностью:

- (•)A1 →  $f(I_{R2} + \Delta I_1) = V_{R2} + \Delta V_2 \Rightarrow$  (•)B → (•)B1,
- (•)B1 →  $f(I_{R2} - \Delta I_2) = V_{R2} + \Delta V_3 \Rightarrow$  (•)C → (•)C1,
- (•)C1 →  $f(I_{R2} + \Delta I_3) = V_{R2} + \Delta V_4 \Rightarrow$  (•)D → (•)D1,
- (•)D1 →  $f(I_{R2} - \Delta I_4) = V_{R2} + \Delta V_5 \Rightarrow$  (•)E → (•)E1,
- (•)E1 → ... (2)

В литературе [5] приводится детальное описание условий сходимости процесса (устойчивости системы) и выбора принципа управления.

При использовании параметрического метода полагают, что все параметры СБ известны. Расчет напряжения выхода ИСБ производится с учетом данных параметров, величины интенсивности солнечного излучения и температуры окружающей среды [3].

В литературе [7, 8] представлены ИСБ с импульсным принципом работы СМ и аналоговой системой

управления. В основе проектирования данного ряда ИСБ лежит метод аппроксимации ВАХ СБ. Эквивалентная схема СЭ (рис. 8) описывается уравнением (3).

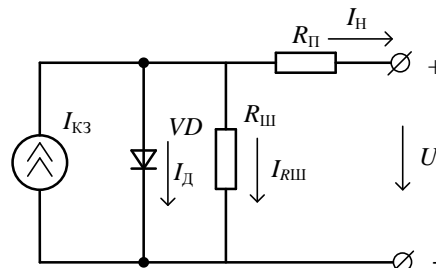


Рис. 8. Эквивалентная схема солнечного элемента для постоянного тока

$$I_H = I_{K3} - I_S \cdot \left( \exp \frac{e \cdot (U + I_H \cdot R_{II})}{A \cdot k \cdot T} - 1 \right) - \frac{U + I_H \cdot R_{II}}{R_{III}}, \quad (3)$$

где  $R_{II}$  – последовательное сопротивление солнечного элемента;  $R_{III}$  – шунтирующее сопротивление;  $A$  – коэффициент (эмпирический параметр ВАХ), полученный при сравнении теоретических и экспериментальных кривых вольт-амперной характеристики.

Обобщенная функциональная схема данных ИСБ представлена на рис. 9.

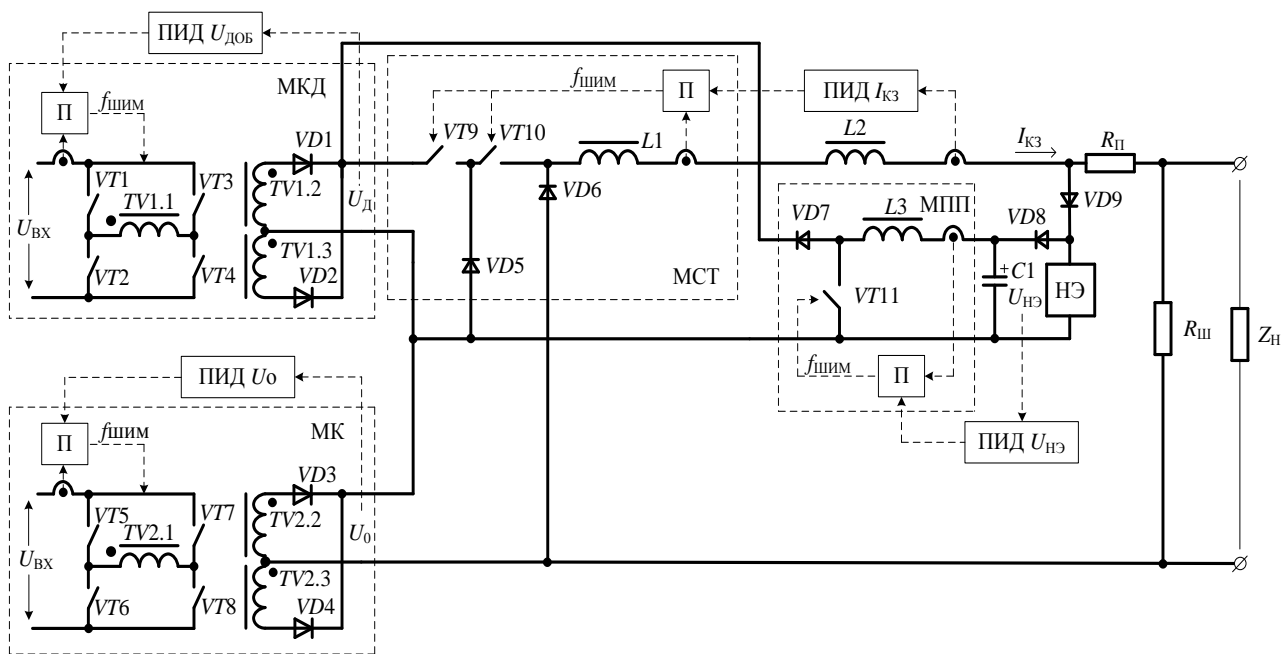


Рис. 9. Функциональная схема ИСБ с импульсным принципом работы СМ и аналоговой системой управления

Подробное описание данного ИСБ представлено в литературе [9].

**ИСБ с линейной топологией построения СМ**

Топологии СМ, работающих в линейном режиме, представляют собой последовательное или параллельное соединение различных видов транзисторов [10, 11].

На рис. 10 представлена структурная схема ИСБ с линейным принципом работы СМ и комбинированной аналого-цифровой системой управления.

СМ состоит из  $N$  включенных параллельно линейных силовых каскадов. Все каскады имеют одинаковые параметры и равные токи, пропорциональные уставке. Отношение уставки и тока ИСБ выражается формулой (4):

$$I_{ИСБ} = N \cdot I_K = N \cdot K_I \cdot U_{уст}, \quad (4)$$

где  $N$  – количество каскадов,  $I_K$  – ток одного каскада,  $K_I$  – масштабирующий коэффициент с учетом напряжения уставки –  $U_{уст}$ . На рис. 11 показана функциональная схема одного линейного силового каскада,



представляющего собой составной транзистор из одного полевого транзистора  $VT_4$  с изолированным затвором (MOSFET) и трех полевых транзисторов с управляющим  $p-n$ -переходом (JFET).

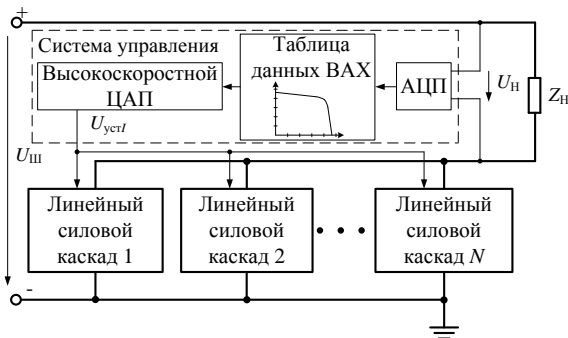


Рис. 10. Структурная схема ИСБ с линейным принципом работы СМ

Ток каждого каскада стабилизируется ПИ-регулятором. Информация о токе в канале снимается с шунта  $R_{ш}$ . Схема на операционном усилителе (ОУ)  $DA_2$  представляет собой усилитель сигнала ОС по

току шунта. Данный сигнал подается на инвертирующий вход ПИ-регулятора, выполненного на ОУ  $DA_1$ . Сигнал выхода ПИ-регулятора подается на схему драйвера силового каскада, выполненного на транзисторах  $VT_1$  и  $VT_2$ .

Мощность рассеивания на MOSFET транзисторах силового блока пропорциональна контролируемому току. Количество токовых каналов зависит от максимальной требуемой мощности ИСБ. Но в конечном счете их количество ограничено конструктивными особенностями, учитывающими расстояние между ними. Увеличение данного расстояния может привести к несогласованности между каналами и как следствие неустойчивости системы и колебаниям.

ИСБ с линейным принципом работы СМ и аналоговой системой управления, где в качестве ЗУ используются источники света или ячейки СБ, интегрированные в схему, а также ЗУ с аналоговой моделью СБ, не нашли широкого применения в промышленной и космической индустриях и используются главным образом как лабораторные экспонаты для быстрой приближенной имитации СБ. В литературе [12, 13] можно найти подробное описание подобных ИСБ.

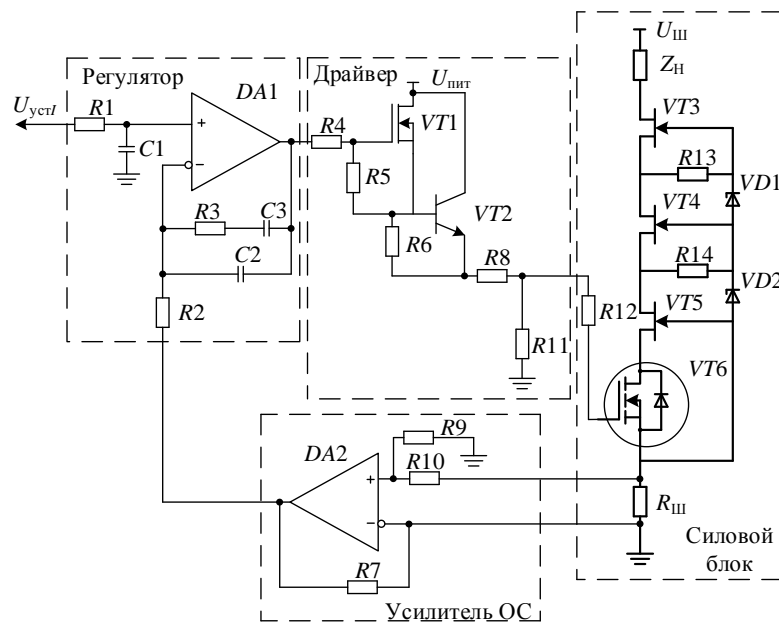


Рис. 11. Функциональная схема линейного силового каскада

### ИСБ с комбинированным СМ

Комбинированный СМ с использованием импульсного и линейного силовых каналов позволяет создать ИСБ достаточно большой мощности (2 кВт и более). На рис. 12 изображена структурная схема рассматриваемого ИСБ. Данную схему можно разделить на две части: блок многоуровневого переключения напряжений (БМПН) и линейный блок (ЛБ) [14, 15].

Принцип работы ЛБ в целом соответствует описанному выше.

Работа БМПН основана на так называемом пошагово-волновом принципе (Step-Wave Approach). В литературе [16] дано его подробное описание. На рис. 13 изображена функциональная схема блока.

БМПН состоит из гальваноразвязанных последовательно соединенных источников напряжения  $Z_N$ , имеющих выходные напряжения  $\Delta U$  и  $U_{\text{баз}}$  (напряжение, равное уровню напряжения насыщения линейного каскада). В результате сравнения напряжения ОС ( $U_n$ ) с опорным напряжением  $U_{\text{урн}}$  компараторов  $DA_N$  происходит формирование сигналов включения  $U_3$  ключей на транзисторах  $K_N$ . В итоге уровень  $U_{ш}$  формируется таким образом, чтобы при условии работы ИСБ в заданной рабочей точке падение напряжения на ЛБ было минимальным.

### Заключение

С учетом особенностей описанных типов ИСБ можно выделить тенденции проектирования с учетом их использования и круга решаемых задач.

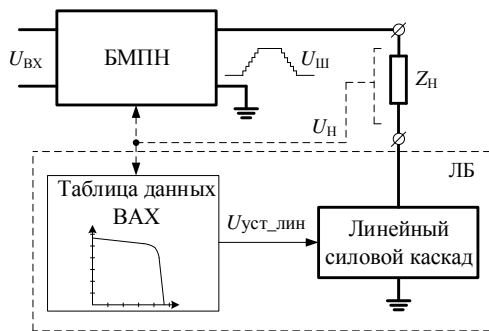


Рис. 12. Структурная схема ИСБ с комбинированным СМ

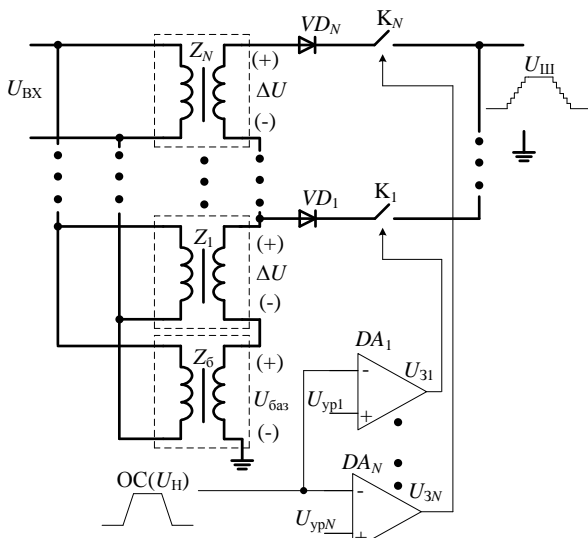


Рис. 13. Функциональная схема блока многоуровневого переключения напряжений

В промышленной индустрии, как правило, используются ИСБ с импульсным принципом работы СМ и цифровой системой управления. Это обусловлено требованиями к повышенной мощности, широкими функциональными возможностями и условно невысокими требованиями к скорости реакции системы ИСБ на возмущающие воздействия.

В космической индустрии, прежде всего, предъявляются высокие требования к скорости реакции системы ИСБ на возмущающие воздействия и относительно невысокие требования к характеристикам мощности. С учетом этого превалирует линейная топология СМ и естественным образом адаптированная к ней аналоговая или комбинированная система управления. Параллельно данной тенденции развивается подход к проектированию ИСБ с импульсным принципом работы СМ. Применять данный ряд ИСБ в космической промышленности во многом позволяет идеология построения СМ, благодаря которой ток короткого замыкания постоянно присутствует во внутреннем контуре ИСБ, за счет чего уменьшается время реакции системы на возмущающее воздействие. В то же время отсюда вытекает недостаток, заключающийся в избыточной мощности, необходимой для поддержания тока КЗ. С другой стороны, импульсный принцип работы СМ способствует увеличению КПД и в определенной степени компенсирует

упомянутый недостаток. В перспективе увеличение производительности микроконтроллеров, составляющих основу ЦСУ, должно привести к замещению аналоговых систем управления на цифровые в ИСБ для космической индустрии.

Работа выполнена в рамках государственного заказа «Фундаментальные аспекты исследований в области микро- и оптоэлектронных систем на основе Si, SiGe и  $A_3B_5$ , интеллектуальных средств преобразования электроэнергии для создания ресурсосберегающих распределенных комплексов электроснабжения с использованием технологий промышленного интернета вещей и радиофотоники».

### Литература

1. Гушин В.Н. Основы устройства космических аппаратов: учеб. издание. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
2. Keysight Technologies. Решение проблем имитации солнечных батарей. Помощь в выборе оптимального источника питания для наземных испытаний спутников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/68230076-Keysight-technologies-reshenie-problem-imitacii-solnechnyh-batarey.html> (дата обращения: 13.04.2020).
3. Khouzam K. Simulation and real-time modelling of space photovoltaic systems / K. Khouzam, L. Cuong, K. Chen Khoun, Ng. Poo Yong // IEEE Trans. – 1994. – Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion – WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC) (5-9 Dec. 1994). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4802769> (дата обращения: 13.04.2020).
4. Koutroulis E., Kalaitzakis K., Tzitzilonis V. Development of an FPGA-based System for real-time simulation of photovoltaic modules // IEEE Trans. – 2006. – Seventeenth IEEE International Workshop on Rapid System Prototyping (RSP'06) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/520770> (дата обращения: 13.04.2020).
5. Yuan Li, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, Dichen Liu. A hybrid control strategy for photovoltaic simulator // IEEE Trans. – 2009. – Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4802769> (дата обращения: 13.04.2020).
6. Zheng Guo Piao, Shu Juan Gong, Yue Heng An, Geum Bae Cho. A study on the PV simulator using equivalent circuit model and look-up table hybrid method // IEEE Trans. – 2013. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS-2013) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6713209> (дата обращения: 13.04.2020).
7. Кремзуков Ю.А., Мишин В.Н., Пчельников В.А. и др. Проектирование модульных имитаторов солнечных батарей автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры систем электропитания автоматических космических аппаратов. – Томск: Том. ун-т, 2014. – 86 с.
8. Кремзуков Ю.А. Имитатор батареи солнечной для наземной отработки и испытаний систем электропитания космических аппаратов на основе импульсных преобразователей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2011. – 28 с.
9. Сравнительный анализ систем управления имитатора вольт-амперной характеристики солнечной батареи / О.Г. Рекутов, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев, А.М. Малышенко // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 89–95.

10. Shanshan Jin. Optimized design of space solar array simulator with novel three-port linear power composite transistor based on multiple cascaded SiC-JFETs / J. Shanshan, Z. Donglai, W. Chao, G. Yu // IEEE Trans. – 2018. – Vol. MTT-65, No. 6. – P. 4691–4701.
11. Shanshan J. Dynamic performance solar array simulator based on a SiC MOSFET linear power stage / J. Shanshan, Z. Donglai, B. Zhiyun, L.H. Xinjun // IEEE Trans. – 2018. – Vol. MTT-33, No. 2. – P. 1682–1695.
12. Ole-Morten Midtgard. A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics // IEEE Trans. – 2007. – European Conference on Power Electronics and Applications. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4417450> (дата обращения: 13.04.2020).
13. Ollila J. A medium power PV-array simulator with a robust control strategy // IEEE Trans. – 1995. – Proceedings of International Conference on Control Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/555638> (дата обращения: 13.04.2020).
14. Shanshan J. High-power high-dynamic-performance space solar array simulator using step-wave tracking output voltage approach / J. Shanshan, Z. Donglai, Q. Lu, L. Mingyu, Z. Xiaofeng, G. Yu // IEEE Trans. – 2018. – Vol. MTT-33, No. 5. – P. 4102–4114.
15. Shanshan J. UI-RI hybrid lookup table method with high linearity and high-speed convergence performance for FPGA-based space solar array simulator / J. Shanshan, Z. Donglai, W. Chao // IEEE Trans. – 2018. – Vol. MTT-33, No. 8. – P. 7178–7192.
16. Qian J. High-efficiency switch-linear-hybrid envelope-tracking power supply with step-wave approach / J. Qian, R. Xinbo, R. Xiaoyong, X. Huan // IEEE Trans. – 2015. – Vol. MTT-62, No. 9. – P. 5411–5421.

#### Рекутов Олег Геннадьевич

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-960-974-71-14  
Эл. почта: rekutov@niiuem.tomsk.ru

#### Юдинцев Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, дир. Научно-исследовательского ин-та автоматики и электромеханики (НИИ АЭМ) ТУСУР Белинского ул., д. 53, г. Томск, Россия, 634034  
Тел.: +7-960-973-03-03  
Эл. почта: yag@niiuem.tomsk.ru

Rekutov O.G., Yudin A.G.

#### Analysis of solar array simulators constructing methods for spacecraft power supply system's physical modeling

The classification of solar array simulators is given. An analysis of various topologies of building a power module and control systems is carried out, according to the classification criteria. The trends and prospects for development are highlighted.

**Keywords:** power supply system, solar array simulator, power module, pulse-width modulation, control system.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-108-115

#### References

1. Gushchin V.N. *Osnovy ustroystva kosmicheskikh apparatov: uchebnoe izdanie* [Bases of the device of spacecrafts]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 2003, 272 p.
2. Keysight Technologies. *Reshenie problem imitatsii solnechnykh batarei. Pomoshch' v vybore optimal'nogo istochnika pitaniya dlya nazemnykh ispytaniy sputnikov* [Keysight Technologies. Solving the challenges of solar array simulation. helping you select the optimal power solution for satellite ground testing]. Available at: <https://docplayer.ru/68230076-Keysight-technologies-reshenie-problem-imitatsii-solnechnyh-batarey.html> (Accessed: April 13, 2019).
3. Khouzam K., Cuong Ly, Chen Khoon Koh, Poo Yong Ng. Simulation and real-time modelling of space photovoltaic systems, *IEEE Trans.*, 1994, Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion – WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC) (5-9 Dec. 1994).
4. Koutroulis E., Kalaitzakis K., Tzitzilonis V. Development of an FPGA-based System for real-time simulation of photovoltaic modules. *IEEE Trans.*, 2006, Seventeenth IEEE International Workshop on Rapid System Prototyping (RSP'06). Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1630770> (Accessed: April 13, 2019).
5. Yuan Li, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, Dichen Liu. A hybrid control strategy for photovoltaic simulator, *IEEE Trans.*, 2009, 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4802769> (Accessed: April 13, 2019).
6. Zheng Guo Piao, Shu Juan Gong, Yue Heng An, Geum Bae Cho. A study on the PV simulator using equivalent circuit model and look-up table hybrid method. *IEEE Trans.*, 2013, 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6713209> (Accessed: April 13, 2019).
7. Kremzukov Yu.A., Mishin V.N., Pchel'nikov V.A et al. *Proektirovanie modul'nykh imitatorov solnechnykh batarei avtomatizirovannoi kontrol'no-ispytatel'noi apparatury sistem elektropitaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov: Monografiya* [Design of modular solar array simulators of the automated control test apparatus of electric power supply systems of automatic spacecrafts]. Tomsk, Tomskii universitet Publ., 2014. 86 p. (in Russ.).
8. Kremzukov Yu.A. *Imitator batarei solnechnoi dlya nazemnoi obrabotki i ispytaniy sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov na osnove impul'snykh preobrazovatelei* [The solar array simulator for ground working off and tests of electric power supply systems of spacecrafts on the basis of pulse converters]. Cand. Diss. Thesis]. Tomsk, 2011, 28 p. (in Russ.).
9. Sravnitel'nyy analiz sistem upravleniya imitatora vol't-ampernoy kharakteristiki solnechnoy batarei [Comparative analysis of I-V curve solar array simulator]. O.G. Rekutov, V.M. Rulevskiy, A.G. Yudin, A.M. Malysheko. *Doklady TUSUR*, 2019, vol. 22, no 4, pp. 89–95 (in Russ.).
10. Shanshan J., Donglai Z., Chao W., Yu G. Optimized design of space solar array simulator with novel three-port linear power composite transistor based on multiple cascaded SiC-JFETs. *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-65, no. 6, pp. 4691–4701.
11. Shanshan J., Donglai Z., Zhiyun B., Xinjun L.H. Dynamic performance solar array simulator based on a SiC MOSFET linear power stage. *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 2, pp. 1682–1695.
12. Ole-Morten Midtgard. A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics, *IEEE Trans.*, 2007, 2007 European Conference on Power Electronics and Applications.

13. Ollila J. A medium power PV-array simulator with a robust control strategy, *IEEE Trans.*, 1995, Proceedings of International Conference on Control Applications. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/555638> (Accessed: April 13, 2019).

14. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Lu Qu, Mingyu Liu, Xiaofeng Zhang, Yu Gu. High-power high-dynamic-performance space solar array simulator using step-wave tracking output voltage approach. *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 5, pp. 4102–4114.

15. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang. UI-RI hybrid lookup table method with high linearity and high-speed convergence performance for FPGA-based space solar array simulator. *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 8, pp. 7178–7192.

16. Qian Jin, Xinbo Ruan, Xiaoyong Ren, Huan Xi. High-efficiency switch-linear hybrid envelope-tracking power supply with step-wave approach. *IEEE Trans.*, 2015, vol. MTT-62, no. 9, pp. 5411–5421.

**Oleg G. Rekotov**

Postgraduate student, Department of Computer Control and Design Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7-960-974-71-14  
Email: rekotov@niiam.tomsk.ru

**Anton G. Yudintsev**

Doctor of Engineering Sciences, Director NII AEM TUSUR 53, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone: +7-960-973-03-03  
Email: yag@niiam.tomsk.ru

УДК 621.3.083

В.Г. Токарев, С.В. Брованов, М.А. Дыбко

## Методика вычисления коэффициента гармоник сетевого тока в трехфазной сети

Предложена методика вычисления коэффициента гармоник тока сети, основанная на математическом аппарате перехода к синхронной вращающейся  $dq$ -системе координат в дискретной форме с последующей статистической обработкой накопленных в течение полного периода первой гармоники отсчетов. Предложенная методика позволяет в реальном времени оценивать качество фазного тока в трехфазной сети и может быть реализована на микроконтроллере, не имеющем аппаратной поддержки функций цифровой обработки сигналов. Из результатов моделирования и экспериментов следует, что процесс вычисления коэффициента гармоник сетевого тока по предложенной методике значительно быстрее в сравнении с методом спектрального анализа.

**Ключевые слова:** вычисление коэффициента гармоник, трехфазная сеть, активный силовой фильтр, качество сетевого тока.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-116-121

В последнее время для улучшения качества сетевого тока в трехфазных сетях вместо пассивных фильтров используются активные силовые фильтры (АСФ) [1–3]. Они имеют ряд преимуществ: во-первых, кроме компенсации высших гармоник тока АСФ позволяют компенсировать реактивную мощность, во-вторых, компенсация высших гармоник тока может осуществляться в более широких пределах по сравнению с пассивными компенсаторами. АСФ представляет собой полупроводниковый преобразователь, выполненный на полностью управляемых силовых элементах (как правило, IGBT транзисторах). Управление силовыми элементами осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ), при этом измерение сетевых токов, токов нагрузки и компенсации, а также расчет сигнала-задания на ток компенсации должны производиться в реальном времени на каждом такте ШИМ в соответствии с заложенной в алгоритм работы АСФ стратегией компенсации.

Существует ряд факторов, влияющих на качество компенсации гармонических составляющих тока сети. Среди них – инерционность системы управления АСФ и ограниченный рабочий диапазон частот АСФ. С целью улучшения качества компенсации гармонических составляющих был предложен ряд алгоритмов [4–6], однако оценка качества компенсации в результате применения того или иного алгоритма осуществлялась по косвенным признакам. В представленных алгоритмах приведение соответствия численного значения некоторого признака к определенному значению коэффициента гармоник сетевого тока осуществлялось посредством моделирования и последующего экспериментального исследования прототипа АСФ в определенных условиях. В первом случае расчет коэффициента гармоник тока осуществлялся посредством встроенных методов среды моделирования, во втором – с помощью специализированных измерительных приборов. Очевидно, что такие подходы не могут гарантировать достаточной достоверности в условиях реальной эксплуатации АСФ. Изменить ситуацию можно,

измеряя коэффициент гармоник сетевого тока непосредственно в точке общего присоединения, однако установка дополнительного измерительного оборудования повлечет удорожание АСФ. Также существует возможность вычисления коэффициента гармоник тока сети, например, методом спектрального анализа, зная отсчеты мгновенных значений фазных токов с последующей их обработкой посредством алгоритма дискретного или быстрого преобразования Фурье (БПФ) [7, 8]. Такие подходы получили весьма широкое распространение в последнее время. Многие современные микроконтроллеры имеют встроенные аппаратные средства для цифровой обработки сигналов и, по сути, являются цифровыми сигнальными процессорами (ЦСП).

### Оценка машинных ресурсов, необходимых для вычисления коэффициента гармоник тока методом спектрального анализа

Для сравнения существующих и предлагаемой методик необходимо оценить затраты машинных ресурсов, требуемых для их реализации. Для этого были использованы рекомендации по применению специализированной функции комплексного БПФ из библиотеки цифровой обработки сигналов CMSIS DSP Software Library для микроконтроллеров ARM архитектуры [9, 10].

В общем случае коэффициент гармоник тока ( $K_{ГТ}$ ) рассчитывается по известной формуле

$$K_{ГТ} = \sqrt{\sum_{n=2}^m \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2}, \quad (1)$$

где  $I_1$  – амплитуда первой гармоники,  $I_n$  – амплитуда  $n$ -й гармоники,  $m$  – максимальный номер гармоники.

В реальной системе максимальный номер гармоники целесообразно задавать исходя из частоты дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова. Кроме того, для оценки качества тока сети допускается задавать максимальный номер гармоники не выше 40-й [11].

Последовательность операций для вычисления  $K_{ГТ}$  с применением функций библиотеки CMSIS

DSP Software Library для одной фазы показана на рис. 1. В трехфазной системе эта последовательность выполняется трижды с последующим усреднением результатов.

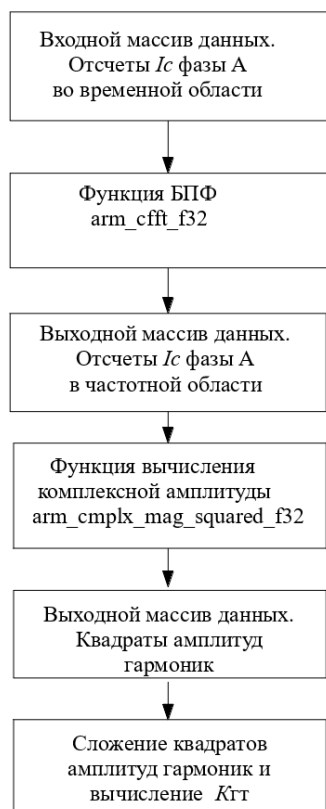


Рис. 1. Последовательность вычисления  $K_{ГТ}$  с применением функций CMSIS DSP Software Library

Для машинной арифметики с плавающей запятой, функция комплексного БПФ `arm_cfft_f32` поддерживает фиксированный размер входного массива данных, кратный степени числа 2: от 16 до 4096 элементов (точек). Каждая точка представлена в виде реальной и мнимой части [9]. Этот же массив данных служит и для размещения результатов комплексного БПФ. Чтобы извлечь из результата комплексного БПФ квадраты амплитуд гармоник, необходимо воспользоваться функцией `arm_cmplx_mag_squared_f32`, результат выполнения которой размещается в новом массиве данных. Затем из полученных квадратов амплитуд по формуле (1) вычисляется  $K_{ГТ}$ . Для оценки машинных ресурсов, необходимых для вычисления  $K_{ГТ}$ , были выбраны входные массивы размером 64, 256 и 1 024 точки. Расчет машинного времени производился в среде разработки IAR Embedded Workbench for ARM версии 7.80 в режиме эмуляции с опцией максимальной оптимизации по скорости выполнения для ЦСП STM32F407VG с тактовой частотой 168 МГц. Полученные в ходе расчетов затраты машинных ресурсов для вычисления  $K_{ГТ}$  представлены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, для вычисления  $K_{ГТ}$  для трех фаз по 64 точкам методом спектрального анализа требуется 78 мкс машинного времени и 768 байт

оперативной памяти. При этом максимальный номер гармоники ограничен 32. Для вычисления  $K_{ГТ}$  по 1 024 точкам потребуется 1 935 мкс и 12 Кбайт оперативной памяти. Так как для системы управления АСФ задача вычисления  $K_{ГТ}$  не является приоритетной и будет выполняться в фоновом режиме, значит, и увеличится временной интервал от момента начала до момента окончания вычисления на неопределенное время. Указанные недостатки метода затрудняют его применение в системах управления АСФ.

Таблица 1  
Затраты машинных ресурсов для вычисления  $K_{ГТ}$  методом спектрального анализа

	Размер входного массива данных, точек		
	64	256	1 024
Суммарное время вычисления, мкс	78	417	1 935
Требуемый размер оперативной памяти, байт	768	3072	12 288

### Предложенная методика вычисления $K_{ГТ}$

Во многих реализациях трехфазных параллельных АСФ для вычисления тока компенсации используется метод активных и реактивных компонент тока (`id-iq-method`) [12]. Применение этого метода предполагает переход от фазной к синхронной вращающейся  $dq$ -системе координат посредством преобразований Е. Кларк [13] и Парка [14] (в отечественной литературе известного как преобразование Парка–Горева).

Для дискретной системы, которой является система управления АСФ, математический аппарат перехода к синхронной вращающейся системе координат имеет прямую аналогию с дискретным преобразованием Фурье (ДПФ). Так, базисные функции ДПФ [8] записываются как

$$C_k[n] = \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (2)$$

и

$$S_k[n] = \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right), \quad (3)$$

где  $C_k[n]$  и  $S_k[n]$  – косинусный и синусный сигналы длиной  $N$  отсчетов,  $k$  – порядок гармоники,  $n$  – текущий отсчет. Тогда для первой гармоники уравнение синтеза сигнала будет представлено в следующем виде:

$$X[n] = \operatorname{Re} \bar{X} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + \operatorname{Im} \bar{X} \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right). \quad (4)$$

Матрица поворота преобразования Парка–Горева выглядит как

$$\begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $i\alpha$  и  $i\beta$  – мгновенные значения тока сети в обобщенной  $\alpha\beta$ -системе координат,  $id$  и  $iq$  – мгновенные значения тока сети в синхронной вращающейся  $dq$ -системе координат,  $\theta$  – угол поворота (рис. 2).

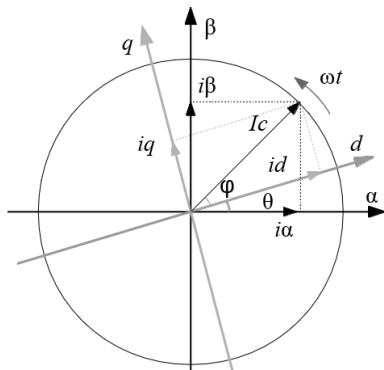


Рис. 2. Обобщенная  $\alpha\beta$ - и синхронная вращающаяся  $dq$ -системы координат

Выразив угол поворота  $\theta$  в дискретном виде

$$\theta = \frac{2\pi n}{N} \quad (6)$$

и подставив в (5), получим выражение для  $id$ , которое идентично (4), где в качестве действительной и мнимой частей сигнала выступают значения  $i\alpha$  и  $i\beta$  соответственно:

$$id = i\alpha \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + i\beta \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right). \quad (7)$$

Подобным образом можно выразить и  $iq$ . Из приведенной аналогии, опираясь на свойства ДПФ, можно заключить, что в дискретной системе для синхронной вращающейся  $dq$ -системы координат, синхронизированной по первой гармонике, при наличии массива мгновенных значений тока сети размером в  $N$  элементов среднее значение по каждой координате будет эквивалентно амплитуде первой гармоники:

$$I_1 = \sqrt{\bar{I}_d^2 + \bar{I}_q^2}, \quad (8)$$

а отклонение от среднего значения следует рассматривать как наличие высших гармоник. Таким образом, вычислить  $K_{ГТ}$  можно, рассчитав среднеквадратичные отклонения от среднего значения тока по каждой из координат:

$$K_{ГТ} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (id_k - \bar{I}_d)^2 / N + \left(\sum_{k=1}^N (iq_k - \bar{I}_q)^2 / N\right)}{\bar{I}_d^2 + \bar{I}_q^2}}. \quad (9)$$

Последовательность операций для вычисления  $K_{ГТ}$  по предложенной методике показана на рис. 3. Первая операция – вычисление средних значений обобщенного тока сети в  $dq$ -координатах выполняется методом «плавающего усреднения» [4–6]. В этом случае нет необходимости производить суммирование на всем интервале усреднения при каждом измерении, достаточно из общей суммы вычесть выбывающее из выборки значение и прибавить новое (рис. 4). Всего для вычисления среднего значения необходимо затратить три математические операции согласно выражению

$$\bar{I}_d = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N id_k = \frac{1}{N} \left[ \sum_{k=i}^{N+i} id_k - id_i + id_{N+i+1} \right], \quad (10)$$

где  $N$  – число отсчетов в выборке на интервале усреднения,  $k$  – номер отсчета,  $i$  – номер первого отсчета в выборке.

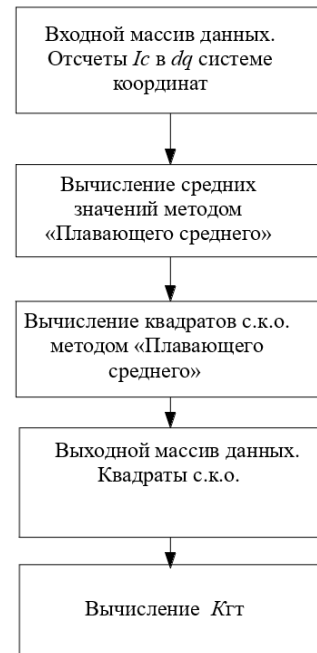


Рис. 3. Последовательность вычисления  $K_{ГТ}$  по предложенной методике

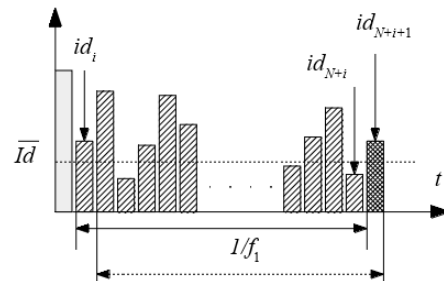


Рис. 4. Вычисление среднего значения  $id$  методом «плавающего усреднения»

По такому же принципу вычисляется и квадрат среднеквадратического отклонения от среднего, после чего выполняется итоговый расчет  $K_{ГТ}$  по формуле (9). Таким образом, появляется возможность иметь актуальный  $K_{ГТ}$  после каждого внесения в выборку мгновенных значений тока сети, однако достоверным результат будет только после полного заполнения выборки на интервале усреднения измеренными значениями.

Расчет машинного времени, необходимого для вычисления  $K_{ГТ}$  по предложенной методике, производился в среде разработки IAR Embedded Workbench for ARM версии 7.80 в режиме максимальной оптимизации по скорости выполнения для ЦСП STM32F407VG с тактовой частотой 168 МГц. Полученные в ходе расчетов затраты машинных ресурсов для вычисления  $K_{ГТ}$  представлены в табл. 2.

Сравнив данные из табл. 1 и 2, можно сделать вывод, что при сходных потребностях в оперативной памяти вычисление по предложенной методике вы-

полняется значительно быстрее, чем вычисление методом спектрального анализа.

Таблица 2  
Затраты машинных ресурсов для вычисления  $K_{ГТ}$  по предложенной методике

	Размер входного массива данных, значений		
	64	256	1024
Суммарное время вычисления, мкс	38	181	652
Требуемый размер оперативной памяти, байт	656	3088	12 304

**Моделирование и экспериментальные исследования**

Для верификации предложенной методики вычисления  $K_{ГТ}$  в среде имитационного моделирования устройств силовой электроники Psim была разработана имитационная модель. Блок-схема имитационной модели представлена на рис. 5. Параметры модели:

- трехфазная питающая сеть 0,4 кВ;
- нелинейная нагрузка в виде трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя и RLC-цепи, где  $L = 1,5$  мГн,  $R = 1$  Ом,  $C = 15$  мкФ.

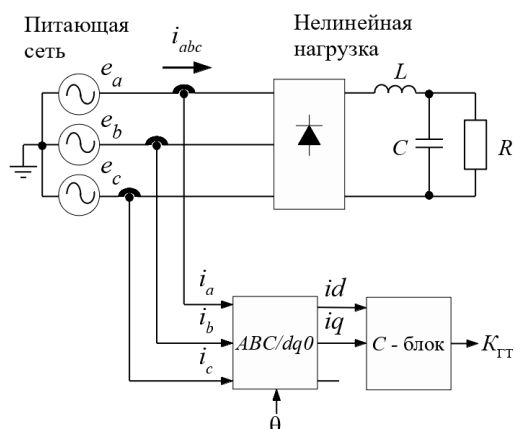


Рис. 5. Блок-схема имитационной модели, выполненная в среде Psim

Алгоритм вычисления  $K_{ГТ}$  реализован на языке С и выполнялся в составе С-блока, на который поступали мгновенные значения тока сети  $id$  и  $iq$  после преобразования в синхронную  $dq$ -систему координат (блок «ABC/dq0»).

Моделирование проводилось при размерах входного буфера в 64, 256 и 1 024 значений. Результат моделирования показан на рис. 6, где  $e_a$  – сетевое напряжение фазы А,  $i_a$  – ток фазы А,  $K_{ГТ}$  – вычисленный по предложенной методике усредненный коэффициент гармоник тока для трех фаз. Как видно из результатов моделирования,  $K_{ГТ}$  меняется скачкообразно в незначительных пределах, обусловленных погрешностями вычисления при моделировании на каждом такте дискретизации. Вычисленный предложенным способом  $K_{ГТ}$  численно соответствовал коэффициентам гармоник токов фаз А, В и С, полученным встроенными средствами анализа пакета моделирования Psim с точностью до третьего знака

после запятой. Этот факт свидетельствует об адекватности предложенной методики вычисления  $K_{ГТ}$ .

Проверка реального времени вычисления проводилась на прототипе АСФ [15] с микропроцессорной системой управления (МПСУ), выполненной на базе ЦСП STM32F407VGT6 с тактовой частотой 168 МГц.

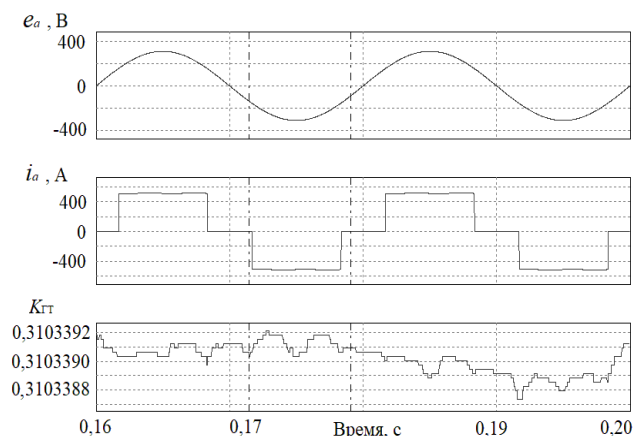


Рис. 6. Результаты моделирования, полученные в среде Psim

Для этого в ходе выполнения встроенной программы перед началом вычисления на заданном выводе ЦСП устанавливался высокий логический уровень, а после окончания – низкий. Время нахождения вывода ЦСП в высоком логическом состоянии измерялось с помощью цифрового осциллографа АК ИП-4115/3А. Полученная экспериментальная оценка времени вычисления  $K_{ГТ}$  приведена в табл. 3.

Таблица 3  
Оценка времени вычисления  $K_{ГТ}$ , полученная экспериментально

	Размер входного массива данных, точек		
	64	256	1 024
Время вычисления $K_{ГТ}$ методом спектрального анализа, мкс	120	620	2750
Время вычисления $K_{ГТ}$ по предложенной методике, мкс	64	266	1 010
Разность, мкс (%)	56 (46%)	354 (57%)	1 740 (63%)

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что вычисление  $K_{ГТ}$  в трехфазной сети по предложенной методике более чем в 2 раза эффективнее, чем вычисление  $K_{ГТ}$  отдельно по каждой фазе методом спектрального анализа с последующим усреднением.

Также в ходе эксперимента была выполнена реализация предложенной методики на отечественном микроконтроллере 1986ВЕ1ТК производства ПКК «Миландр», который не поддерживает на аппаратном уровне операции с плавающей запятой и функции ЦСП. Вычисление тригонометрических функций было реализовано табличным способом и производилось нормирование мгновенных значений в



выборке с тем, чтобы результаты вычислений не вызвали переполнения целочисленных переменных. Затраты на вычисление  $K_{ГТ}$  были сопоставимы с приведенными для ЦСП, что говорит о пригодности предложенной методики для реализации на неспециализированных микроконтроллерах.

#### Заключение и выводы

В ходе проведенной работы предложена методика вычисления коэффициента гармоник тока для трехфазной сети переменного тока. Она основана на статистическом анализе выборки мгновенных значений фазных токов в синхронной вращающейся  $dq$ -системе координат, синхронизированной по напряжению фазы А. В ходе исследования показано, что предложенная методика дает преимущество по скорости вычисления более чем в два раза по сравнению с методом спектрального анализа, основанным на быстром преобразовании Фурье, в случае последовательного вычисления коэффициента гармоник по каждой фазе с последующим усреднением.

Другим достоинством предложенной методики является то, что число значений в выборке для анализа может быть не кратным  $2^n$ . Это упрощает структуру аппаратной части системы управления АСФ, так как число значений в выборке связано с частотой дискретизации и кратностью ШИМ. Предложенная методика не предполагает использование аппаратных функций цифровой обработки сигналов и пригодна для неспециализированных микроконтроллеров. Кроме того, становится возможным иметь результат расчета коэффициента гармоник на каждом такте дискретизации при условии, что вся выборка заполнена актуальными значениями.

Наиболее хорошо предложенная методика подходит для систем управления АСФ, в которых для вычисления сигнала-задания на ток компенсации реализован метод активных и реактивных компонент тока ( $id$ - $iq$  method), в этом случае результаты математических преобразований, выполняемых в ходе вычисления тока компенсации, также используются и для вычисления коэффициента гармоник. Сфера применения предложенной методики не ограничивается АСФ, возможно её применение в любых трехфазных системах, где существует необходимость контроля коэффициента гармоник тока.

#### Литература

1. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – USA: John Wiley & Sons, 2007. – 379 p.
2. Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1996. – Vol. 32, Iss. 6. – P. 1312–1322.
3. Montero M.I.M. Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems / M.I.M. Montero, E.R. Cadaval, F.B. González // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, No. 1. – P. 229–236.
4. Routimo M. A Novel Simple Prediction Based Current Reference Generation Method for an Active Power Filter / M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa // 35-th Annual IEEE Power

Electronics Specialists Conference. – Aachen, Germany, 2004. – P. 3215–3220.

5. Pettersson S. A Simple Prediction Based Current Reference Generation Method for a Four-Wire Active Power Filter / S. Pettersson, M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa // 12-th International Power Electronics and Motion Control Conference. – Portoroz, Slovenia, 2006. – P. 1648–1653.

6. Improving the Active Power Filter Performance with a Prediction-based Control Method / V.G. Tokarev, S.V. Brovanov, A.A. Yakimenko, A.V. Sidorenko, D.V. Solovlev // The 17 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Erlagol, Altai, 2016. – P. 577–582.

7. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов: справочник / Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.

8. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / пер. с англ. А.Ю. Линовича, С.В. Витязева, И.С. Гусинского. – М.: Додэка XXI в., 2011. – 720 с. [Электронное издание на CD].

9. CMSIS DSP Software Library Version 1.7.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/index.html>, свободный (дата обращения: 01.08.2019).

10. AN4841 Application note. Digital signal processing for STM32 microcontrollers using CMSIS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00273990.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00273990.pdf), свободный (дата обращения: 01.08.2019).

11. ГОСТ Р 30804.3.12–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний. Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 22 с.

12. Soares V. Active power filter control circuit based on the instantaneous active and reactive current  $id$ - $iq$  method / V. Soares, P. Verdelho, G.D. Marques // The 28 annual IEEE power electronics specialists conference, PESC'97 Record. – USA, 1997. – Vol. 2. – P. 1096–1101.

13. Duesterhoeft W.C. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components / W.C. Duesterhoeft, M.W. Schulz, E. Clarke // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1951. – Vol. 70, No. 2. – P. 1248–1255.

14. Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1929. – Vol. 48, No. 3. – P. 716–727.

15. Имитационная и экспериментальная верификация прогнозирующего алгоритма управления активным силовым фильтром / В.Г. Токарев, С.В. Брованов, М.А. Дыбко, А.В. Удовиченко // Труды Семнадцатой Междунауч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург, 2018. – С. 28–33.

#### Токарев Вадим Геннадьевич

Ст. преп. каф. вычислительной техники Новосибирского государственного технического ун-та (НГТУ)  
К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия. 630073  
ORCID 0000-0002-3085-1477  
Тел.: +7 (383-3) 46-11-53  
Эл. почта: v.tokarev@corp.nstu.ru

**Брованов Сергей Викторович**

Д-р техн. наук, проректор по учебной работе НГТУ  
К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073  
Тел.: +7 (383-3) 46-04-22  
Эл. почта: brovanov@corp.nstu.ru

**Дыбко Максим Александрович**

Канд. техн. наук, зам. зав. каф. электроники  
и электротехники НГТУ  
К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073  
ORCID 0000-0002-5498-7010  
Тел.: +7 (383-3) 46-48-14  
Эл. почта: dybko@corp.nstu.ru

Tokarev V.G., Brovanov S.V., Dybko M.A.

**Technique to calculate total harmonic distortion of phase current in a three-phase power system**

In this paper, a technique to calculate the total harmonic distortion of the line current in a three-phase power system is proposed. This technique uses mathematical equations describing a transition to a synchronous rotating reference frame in the discrete form and statistical treatment of data accumulated during the period of the fundamental harmonic.

The proposed technique allows to evaluate the quality of the line current in a three-phase power system in real time and can be implemented on a microcontroller that does not have a digital signal processing feature.

Simulation results and experiments have shown that calculation of the total harmonic distortion of phase current in a three-phase power system by the proposed technique is much faster than by the spectral analysis method.

**Keywords:** total harmonic distortion calculation, three-phase power system, active power filter, power quality.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-116-121

*References*

1. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. USA, John Wiley & Sons, 2007, 379 p.
2. Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, v. 32, iss. 6, pp. 1312–1322.
3. Montero M.I.M., Cadaval E.R., González F.B. Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 229–236.
4. Routimo M., Salo M., Tuusa H., A Novel Simple Prediction Based Current Reference Generation Method for an Active Power Filter. *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 2004, pp. 3215–3220.
5. Pettersson S., Routimo M., Salo M., Tuusa H. A Simple Prediction Based Current Reference Generation Method for a Four-Wire Active Power Filter. *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Portoroz, Slovenia, 2006, pp. 1648–1653.
6. Tokarev V.G., Brovanov S.V., Yakimenko A.A., Sidorenko A.V., Solovov D.V. Improving the Active Power Filter Performance with a Prediction-based Control Method. *The 17th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM)*, Erlagol, Altai, 2016, pp. 577–582.
7. Goldenberg L.M., Matyushkin B.D., Polyak M.N., *Cifrovaya obrabotka signalov: Spravochnik* [Digital signal

processing: Directory]. M., Radio i svyaz Publ., 1985, 312 p. (in Russ.)

8. Smith S.W. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Newnes Publ, 2003, 650 p. [Electronic edition on CD].

9. CMSIS DSP Software Library Version 1.7.0. Available at: <http://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/index.html>. (Accessed: August 01, 2019).

10. AN4841 Application note. Digital signal processing for STM32 microcontrollers using CMSIS. Available at [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00273990.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00273990.pdf). (Accessed: August 01, 2019).

11. GOST R 30804.3.12–2013. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy garmonicheskikh sostavlyayushchih toka, sozdavaemykh tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom bolee 16 A, no ne bolee 75 A (v odnoj faze), podklyuchaemyimi k nizkovol'nym raspredelitel'nym sistemam elektrosnabzheniya. Normy i metody ispytaniy*, [GOST R 30804.3.12–2013. Electromagnetic compatibility of technical equipment. The norms of the harmonic components of the current created by technical means with a current consumption of more than 16 A, but not more than 75 A (per one phase), connected to low-voltage power distribution systems. Standards and test methods]. M., Standartinform Publ., 2014, 22 p. (in Russ.).

12. Soares V., Verdelho P., Marques G.D. Active power filter control circuit based on the instantaneous active and reactive current  $i_d$ - $i_q$  method. *The 28 annual IEEE power electronics specialists conference, PESC'97*, Record, USA, 1997, vol. 2, pp. 1096–1101.

13. Dueterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1951, vol. 70, no. 2, pp. 1248–1255.

14. Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1929, vol. 48, no. 3, pp. 716–727.

15. Tokarev V.G., Brovanov S.V., Dybko M.A., Udovichenko A.V. [Modeling and Experimental Verification of a Prediction Algorithm for Controlling an Active Power Filter]. *Proc. 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*, Ekaterinburg, 2018, pp. 28–33 (in Russ.).

**Vadim G. Tokarev**

Novosibirsk State Technical University (NSTU)  
20, K. Marx Ave., Novosibirsk, Russia, 630073  
ORCID 0000-0002-3085-1477  
Phone: +7 (383-3) 46-11-53  
Email: v.tokarev@corp.nstu.ru

**Sergey V. Brovanov**

Doctor of Engineering Sciences NSTU  
20, K. Marx Ave., Novosibirsk, Russia, 630073  
Phone: +7 (383-3) 46-04-22  
Email: brovanov@corp.nstu.ru

**Maxim A. Dybko**

Candidate of Engineering Sciences NSTU  
20, K. Marx Ave., Novosibirsk, Russia, 630073  
ORCID 0000-0002-5498-7010  
Phone: +7 (383-3) 46-48-14  
Email: dybko@corp.nstu.ru

УДК 621.313.333

Л.А. Паук, Н.А. Воронина, Д.Ю. Ляпунов

## Специальные режимы работы в безредукторном электроприводе вибростола

Для реализации специальных режимов работы был рассмотрен алгоритм формирования питающих напряжений безредукторного электропривода вибростола. Особенностью рассматриваемого электропривода является машина двойного питания (МДП), которая выступает в роли приводного двигателя вибросистемы. Показано, что в случае с МДП как исполнительного двигателя, работающего в колебательном, колебательно-вращательном и полигармоническом режимах, наилучшие характеристики имеет силовой электропривод с косинусоидально-частотной модуляцией управляющего сигнала. Разработана математическая модель МДП, позволяющая исследовать различные режимы работы виброоборудования. Обоснованы актуальность данного вопроса и его практическая значимость для вибростолов различного назначения. Использована методика оценки влияния параметров нагрузки на динамические показатели исполнительного двигателя. Даны анализ влияния параметров источника питания и нагрузки на динамические показатели исполнительного электродвигателя и некоторые практические рекомендации.

**Ключевые слова:** электропривод вибростолов, силовой привод, колебательно-вращательный режим работы, вибродиагностика, машина двойного питания, динамические показатели.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-122-130

Безредукторный колебательный электропривод всё чаще используется в различных областях, а именно: портативные устройства; медицина; программы подготовки и восстановления спортсменов-олимпийцев; вибрационные косметические аппараты; вибрационная автоматическая сборка деталей; интенсификация физических и химических процессов, добыча нефти и т.д. [1–3, 8].

В табл. 1 приведены основные области применения электроприводов виброустановок различного назначения и требования, предъявляемые к ним. В виброустановках, применяемых в сельском хозяйстве, горной и химической промышленности (табл. 1), достаточно регулировать только амплитуду и частоту колебаний дискретно. К виброустановкам остальных отраслей народного хозяйства предъявляются повышенные требования к управляемости приводов. Для полного обеспечения технологического процесса они должны регулироваться плавно в процессе работы, обеспечивая требуемые амплитуду, частоту, фазу и гармонический состав питающих токов и напряжений (см. табл. 1).

Широко и разнообразно используются механические колебания в технике измерения, контроля и управления, занимающей амплитудно-частотную область с границами по линейным колебаниям:  $10^{-3} \dots 10^3$  Гц,  $10^{-6} \dots 3$  м,  $2 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^3$  м/с<sup>2</sup> и по углам:  $0,1 \dots 10^3$  Гц,  $10^{-2} \dots 180$  рад,  $0,5 \dots 5 \cdot 10^4$  рад/с<sup>2</sup>.

Данная область применения вибрационных электроприводов отличается необходимостью плавного регулирования всех параметров колебаний с последующей стабилизацией их по амплитуде и частоте с точностью:  $0,5 \dots 10\%$ , по фазе  $2,5 \dots 20^\circ$ . В экспериментальных измерительных установках требуются низкочастотные гармонические колебания ( $10^{-2} \dots 10^{-4}$  Гц). Здесь применяются пилообразные и гармонические колебания с перемещением нейтрали, а также используются двухкоординатные колебания для получения разнообразных траекторий сканирования.

К вибрационной технике (виброплатформы, вибростолы) предъявляется ряд требований, которые необходимо выполнять неукоснительно, а именно: амплитуда колебаний, их частота, точность и многое другое [2, 4, 5]. При формировании колебаний вибродиагностической платформой можно воспользоваться генератором колебаний на базе МДП, который работает в колебательном, колебательно-вращательном и полигармоническом режимах (рис. 1). Особенностью реализации последнего является то, что обмотки статора запитываются токами одной частоты, а обмотки ротора – токами другой частоты или наоборот [3].

В данной работе предложены способы формирования: колебательного, колебательно-вращательного и полигармонического режимов работы безредукторного электропривода вибростола. В качестве исполнительного двигателя используется МДП при формировании напряжения питания обмоток двигателя различными способами [2, 3, 5–7], которые относятся к специальным режимам.

Функциональная схема электромеханического преобразователя энергии (ЭМПЭ) представлена на рис. 1.

Алгоритмы, разработанные авторами данной статьи можно использовать и для традиционных электроприводов, используемых для технологических процессов в промышленности, где требуется колебательный режим работы [9–11].

### Методика

Для случая машины двойного питания система уравнений Кирхгофа в общем виде, описывающая электромагнитные процессы, протекающие в МДП, представлена в работах [3, 12, 13].

В отличие от обычного жесткого периодического реверса здесь электромагнитный момент при смене направления движения становится бесконечно малым, чем обеспечивается плавность колебаний. Функции же управления в случае реализации колеба-

ний при амплитудно-фазовой или частотно-токовой модуляции питающих токов (мгновенные временные зависимости источников тока) в общем виде запишем как

$$\begin{aligned} I_{\alpha s}(t) &= v_1 I_{m1} \sin(\omega_1 t + \alpha'); \\ I_{\beta s}(t) &= v_2 I_{m2} \sin(\omega_2 t + \beta'); \\ I_{\alpha r}(t) &= -v_3 I_{m3} \sin(\omega_3 t + \gamma) \cos(\theta) \pm I_{m4} \sin(\omega_4 t + \phi) \sin(\theta); \\ I_{\beta r}(t) &= v_4 I_{m4} \sin(\omega_3 t + \phi) \cos(\theta) \pm \\ &\pm I_{m3} \sin(\omega_4 t + \gamma) \sin(\theta). \end{aligned} \quad (1)$$

Выражения для функций управления при питании от источника напряжения обмоток статора и ротора машины двойного питания в преобразованных осях  $\alpha, \beta, 0$  в общем виде имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} U_{\alpha s}(t) &= v_1 U_{m1} \sin(\omega_1 t + \alpha'); \\ U_{\beta s}(t) &= v_2 U_{m2} \sin(\omega_2 t + \beta'); \\ U_{\alpha r}(t) &= v_3 U_{m3} \sin(\omega_3 t + \gamma) \cos(\theta) \pm \\ &\pm v_3 U_{m4} \sin(\omega_4 t + \phi) \sin(\theta); \\ U_{\beta r}(t) &= -v_4 U_{m4} \sin(\omega_3 t + \gamma) \sin(\theta) \pm \\ &\pm v_4 U_{m3} \sin(\omega_4 t + \phi) \cos(\theta). \end{aligned} \quad (2)$$

Таблица 1

## Области применения вибрационных электроприводов и технические требования, предъявляемые к ним

Отрасли производства	Технологическая операция	Параметры линейного и углового режима колебаний				Параметры нагрузки	
		Частота, Гц	Амплитуда, м <sup>-3</sup> ; рад	Ускорение, м/с <sup>2</sup> ; рад/с <sup>2</sup>	Закон	Масса, момент инерции, кг; Г·см/с <sup>2</sup>	Мощность привода, кВт
Машиностроение	Виброточение.	1...2·10 <sup>4</sup>	5·10 <sup>-4</sup> ...10	1...10 <sup>4</sup>	Г, ГН	0,1...1	0,5...2
	Виброфрезерование.	10 <sup>-2</sup> ...10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> ...2·10 <sup>-2</sup>	0,5...10 <sup>4</sup>	Г, ГН	0,1...1	0,5...2
	Виброшлифование.	0,1...50	0,1...180	2...2·10 <sup>3</sup>	ГН	10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-3</sup>	0,4...2
	Выбросверление.	50...100	10 <sup>-3</sup> ...0,1	1...40	ГН	0,1...1	0,5...2
	Вибросварка.	10...100	1...10	4...400	ГН	0,5...3	0,2...2
	Виброобкатка.	20...120	0,2...8	10 <sup>2</sup> ...1,5·10 <sup>2</sup>	ГН	0,1...0,5	0,12...1,2
	Виброгалтовка	1...60	0,5...10	0,5...70	Г, ГД	1...10 <sup>2</sup>	0,5...20
Строительство	Виброуплотнение.	50...350	10 <sup>-2</sup> ...1	10...10 <sup>3</sup>	ПГ	–	0,6...11
	Вибропогружение.	5...40	1...15	1...10 <sup>3</sup>	С	–	10...100
	Вибродробление	50...300	0,1...5	10...10 <sup>3</sup>	С	1...10 <sup>2</sup>	0,4...2
Горная промышленность	Вибровыпуск руды.	8...200	0,5...10	50...2·10 <sup>3</sup>	С	10 <sup>2</sup> ...10 <sup>4</sup>	2...50
	Отделение руды.	15...100	2...40	2...2·10 <sup>3</sup>	С	–	3·10 <sup>-2</sup> ...1,5
	Вибробурение	5...47	1...5	1,5...150	С	–	1...15
Сельское хозяйство	Вибросортировка.	10...50	1...5	5...500	ГД	10...10 <sup>2</sup>	1...12
	Виброобмолот.	25...50	5...10	10 <sup>2</sup> ...10 <sup>4</sup>	С	10...10 <sup>2</sup>	1...15
	Вибровспашка.	10...20	10...25	40...400	С	10...10 <sup>2</sup>	1...10
	Виброуборка плодов	3...10	5...25	2...100	С	–	1...8
Химическая промышленность	Вибросмещение.	3...25	10...90	4...2·10 <sup>3</sup>	С	0,1...10 <sup>2</sup>	0,2...5
	Виброизмельчение.	25...100	0,2...5	5...500	С	0,1...10 <sup>2</sup>	0,1...1
	Вибросушка.	25...100	0,5...3	15...300	С	0,1...10 <sup>2</sup>	0,1...1
	Виброочистка газов	25...50	1...5	25...10 <sup>4</sup>	С	–	0,1...0,8
Техника измерения, контроля и управления	Виброориентирование.	0,1...10	1...180	0,5...5·10 <sup>4</sup>	П, Г	10 <sup>-9</sup> ...10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-3</sup> ...0,1
	Вибролинеаризация.	25...100	10 <sup>-2</sup> ...10	1...10 <sup>3</sup>	П	10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-1</sup>	5·10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-1</sup>
	Виброзащита	1...10 <sup>3</sup>	0,1...20	1...10 <sup>3</sup>	Г	0,5...10	0,1...2
Испытательная техника	Калибровочное вибровозбуждение.	10 <sup>-2</sup> ...50	2·10 <sup>-2</sup> ...60	2...2·10 <sup>3</sup>	Г	10 <sup>-7</sup> ...10 <sup>-6</sup>	0,05...0,2
	Силовое возбуждение.	0,1...10 <sup>3</sup>	1,2...10	5...500	Г	–	0,1...10
	Вибропрочность.	5...10 <sup>4</sup>	2·10 <sup>-2</sup> ...20	1...10 <sup>3</sup>	Г	2...200	1...46
	Виброустойчивость.	8...400	5·10 <sup>-2</sup> ...10	50...10 <sup>4</sup>	Г	–	0,2...2
	Качение по частоте.	5...10 <sup>4</sup>	10 <sup>-3</sup> ...10	50...500	Г	10 <sup>-7</sup> ...10 <sup>-4</sup>	1...46
	Моделирование вибронагрузок	0,5...10 <sup>3</sup>	0,1...10	10...500	Г	2...200	0,2...2
		25...100	0,1...2	2...800	Г	1...20	0,1...2
Бытовая техника, реклама	Вибропривод	0,5...5	1...5	2·10 <sup>-2</sup> ...5	ПГ	10 <sup>-4</sup> ...10 <sup>-2</sup>	0,5...4
Портативные информационные терминалы	Линейный вибратор	0,3...300	1,5·10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-1</sup>	15...10 <sup>2</sup>	Г	10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-1</sup>	0,05...0,6
Нефтегазовая отрасль	Вибробурение	5...15	2,5·10 <sup>-2</sup> ...10 <sup>-1</sup>	3,8...2·10 <sup>3</sup>	Г	10 <sup>2</sup> ...10 <sup>3</sup>	1...15

*Примечание* Для закона колебаний приняты следующие сокращения: Г – гармонический; ГН – гармонический со смешением нейтралей; ГД – гармонический двухкоординатный; ПГ – полигармонический; П – пилообразный; ПН – пилообразный со смешением нейтралей; С – случайный.

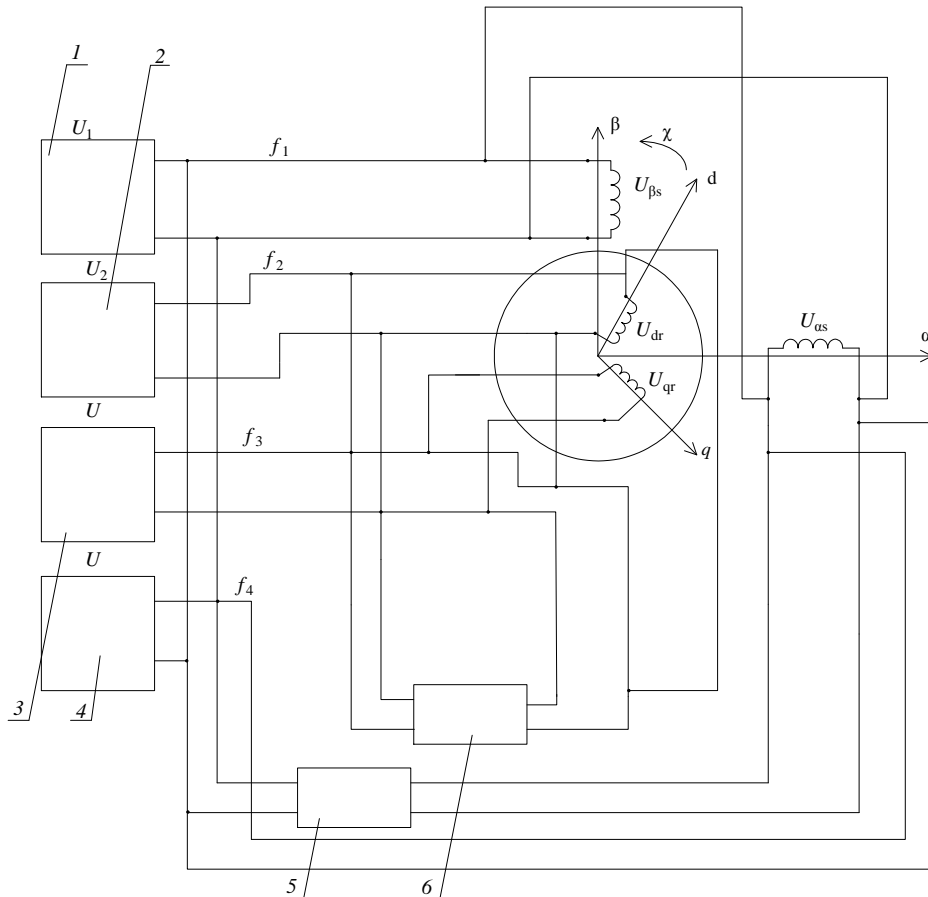


Рис. 1. Схема включения ЭМПЭ при полигармоническом режиме работы: 1...4 – источники питания обмоток статора и ротора; 5, 6 – фазосдвигающие устройства в обмотках статора и ротора

Выражения для функций управления при питании от источника напряжения обмоток статора и ротора машины двойного питания в преобразованных осях  $\alpha, \beta, 0$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} U_{\alpha s}(t) &= v_1 U_{m1} \sin(\omega_1 t + \alpha'); \\ U_{\beta s}(t) &= v_2 U_{m2} \sin(\omega_2 t + \beta'); \\ U_{\alpha r}(t) &= v_3 U_{m3} \sin(\omega_3 t + \gamma) \cos(\theta) \pm v_4 U_{m4} \sin(\omega_4 t + \phi) \sin(\theta); \\ U_{\beta r}(t) &= -v_4 U_{m4} \sin(\omega_3 t + \gamma) \sin(\theta) \pm v_3 U_{m3} \sin(\omega_4 t + \phi) \cos(\theta), \end{aligned} \tag{2}$$

где  $U_{m1}, U_{m2}, U_{m3}, U_{m4}$  – амплитудные значения фазных напряжений обмоток статора и ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\omega_1 \dots \omega_4$  – угловые частоты вращения магнитных полей статора и ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\alpha', \beta', \gamma, \phi$  – начальные фазовые сдвиги питающих напряжений обмоток статора и ротора исполнительного двигателя;  $\theta$  – угол пространственного сдвига обмоток.

На примере колебательного режима работы как одного из специальных режимов [14–16] покажем формирование качающегося магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины двойного питания. Качающееся магнитное поле возникает в воздушном зазоре МДП, если хотя бы одно из фазных потокоцеплений представляет собой периодическую временную функцию частоты  $\omega$ , балансно-модулированную периодическим сигналом частоты  $\Omega$  по амплитуде или частоте или модулированную мо-

нотонным сигналом со средней скоростью  $\Omega$   $\nu$  по фазе [2, 4].

Например, при синусоидальной балансной амплитудной модуляции напряжения (тока) выражения для потокоцеплений обмоток статора по оси  $\beta$  запишем в виде

$$\begin{aligned} \Psi_{\alpha s}(t) &= \Psi_{m1} \cos(\omega t + \beta'); \\ \Psi_{\beta s}(t) &= \Psi_{m2} \sin(\Omega t + \alpha') \cos(\omega t + \beta'), \end{aligned} \tag{3}$$

и тогда перемещение пространственного результирующего вектора потокоцепления (рис. 2, а) в воздушном зазоре можно описать законом:

$$\chi_0 = \arg[\Psi_s] = \arctg \left[ \Psi_{m1}^{-1} \Psi_{m2} \sin(\Omega t + \alpha') \operatorname{tg}(\omega t + \beta') \right], \tag{4}$$

где  $\chi_0$  – обобщенная координата положения вектора  $\Psi_s$ , рад. Для электродвигателей углового колебательного движения  $\chi_0 = \phi_0$ , а для двигателей прямолинейного колебательного движения  $\chi_0 = (\pi \phi_0) / \tau$ , где  $\chi_0$  – линейная координата вектора  $\Psi_s$ ;  $\tau$  – полюсное деление.

В случае балансной косинусоидальной частотной модуляции напряжений (токов) питания выражения для потокоцеплений обмоток статора по осям  $\alpha$  и  $\beta$  запишем в виде

$$\begin{aligned} \Psi_{\alpha s}(t) &= \Psi_{m1} \cos(\omega \int \cos(\Omega t + \alpha') dt + \beta'); \\ \Psi_{\beta s}(t) &= \Psi_{m2} \sin(\omega \int \cos(\Omega t + \alpha') dt + \beta'), \end{aligned} \tag{5}$$

закон движения поля (см. рис. 2, б) имеет вид

$$\chi_0 = \arctg \left[ \psi_{m1}^{-1} \psi_{m2} \operatorname{tg} \left[ \omega \int \cos(\Omega t + \alpha') dt + \beta' \right] \right]. \quad (6)$$

При линейной фазовой модуляции питающего напряжения (тока) выражения для потокосцеплений обмоток статора по оси  $\beta$  запишем в виде

$$\begin{aligned} \psi_{\alpha s}(t) &= \psi_{m1} \cos(\omega t + \beta'); \\ \psi_{\beta s}(t) &= \psi_{m2} \sin[(\omega t + \beta') + (\Omega t + \alpha')], \end{aligned} \quad (7)$$

закон движения поля (рис. 2, в):

$$\chi_0 = \arctg \left[ \psi_{m1}^{-1} \psi_{m2} \left[ \operatorname{tg}(\omega t + \beta') \cos(\Omega t + \alpha') + \sin(\Omega t + \alpha') \right] \right]. \quad (8)$$

При частотной модуляции закон движения поля близок к синусоидальному. Особенно заметным это становится при отношении  $\psi_{m1}/\psi_{m2} \approx 1$ , поскольку закон движения поля, а следовательно, и подвижной части электродвигателя, практически повторяет закон модуляции. Это означает, что способ частотной модуляции позволяет строить хорошо управляемые вибрационные электроприводы, работающие в специальных режимах работы. Поэтому в дальнейшем

будем использовать амплитудную и косинусоидальную частотную модуляцию при развертке частоты колебаний.

При исследовании электромеханических переходных процессов, протекающих в МДП, работающей в специальных режимах работы, необходимо: задать начальные условия (данные о нагрузке, функциях регулирования), определить базовые величины и рассчитать параметры двигателя в относительных единицах, а также коэффициенты, входящие в математическую модель [1, 17]. Последние приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Параметры исследуемого двигателя										
Энергетические показатели			Механическая характеристика			Параметры схемы замещения				
$\cos(\varphi)$	$p$	$\eta$	$m_m$	$s_{ном}$	$s_{кр}$	$x_\mu$	$R'_1$	$x'_1$	$R'_2$	$x'_2$
о.е.		%	о.е.	%	%	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.
0,7	4	80	0,5	6,4	9	1,6	0,06	0,11	0,094	0,175

Таблица 3

Основные базовые величины				Вспомогательные базовые величины						
$U_b$	$I_b$	$P_b$	$\omega_b$	$t_b$	$Z_b$	$L_b$	$M_{мехb}$	$L_{мехb}$	$R_{мехb}$	$C_{mb}$
В	А	Вт	рад/с	с	Ом	Гн	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}^3}{\text{рад}^3}$	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}^2}{\text{рад}^2}$	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$
311,127	18,225	8,5	314,159	0,00319	17,071	0,054	108,297	0,00439	1,379	433,187

Алгоритм расчета математической модели МДП при питании от источников токов, реализованный в интегрированной математической среде моделирования, представлен на рис. 3.

Исходными данными для расчета являются параметры двигателя и источника питания, начальные условия координаты и скорости ротора двигателя, интервал изменения времени  $t$ , количество точек для численных расчетов. Они задаются в блоках 2, 3, 4 (см. рис. 3).

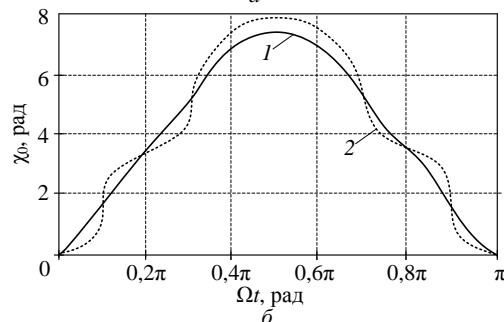
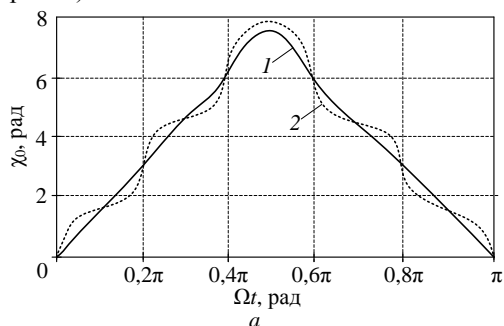


Рис. 2 (начало)

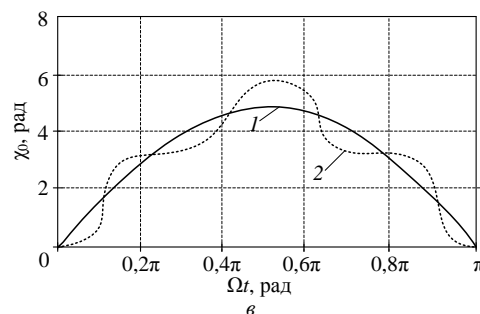


Рис. 2 (окончание). Полу периоды колебаний положения пространственного результирующего вектора потокосцепления при: синусоидальной балансной амплитудной (а);

линейной фазовой (б) и балансной косинусоидальной частотной (в) модуляциях МДС в случае:  $\Omega/\omega = 0,2$ ;  $\alpha = \beta = 0$ ; 1 –  $\psi_{m1} = \psi_{m2}$ ; 2 –  $\psi_{m1} = 5\psi_{m2}$ ; 1 – математическое моделирование; 2 – аналитические выражения

В блоке 5 определяется приращение интервала времени  $\Delta t$ , влияющее на точность вычисления. В блоках 6–8 производится расчёт требуемых величин с дальнейшей проверкой результата (блок 9) и вывода их в виде графика.

Система итерационных уравнений для электромеханического преобразователя, работающего в режиме МДП (в общем случае), при питании его от источника тока соответствует системе (9), где  $t_j$  – время модели;  $\Delta t$  – интервал приращения времени;  $I_1 \dots I_4$  – амплитудные значения относительных токов обмоток статора и ротора;  $\omega'_1 \dots \omega'_4$  – относительные значения угловых скоростей вращения.

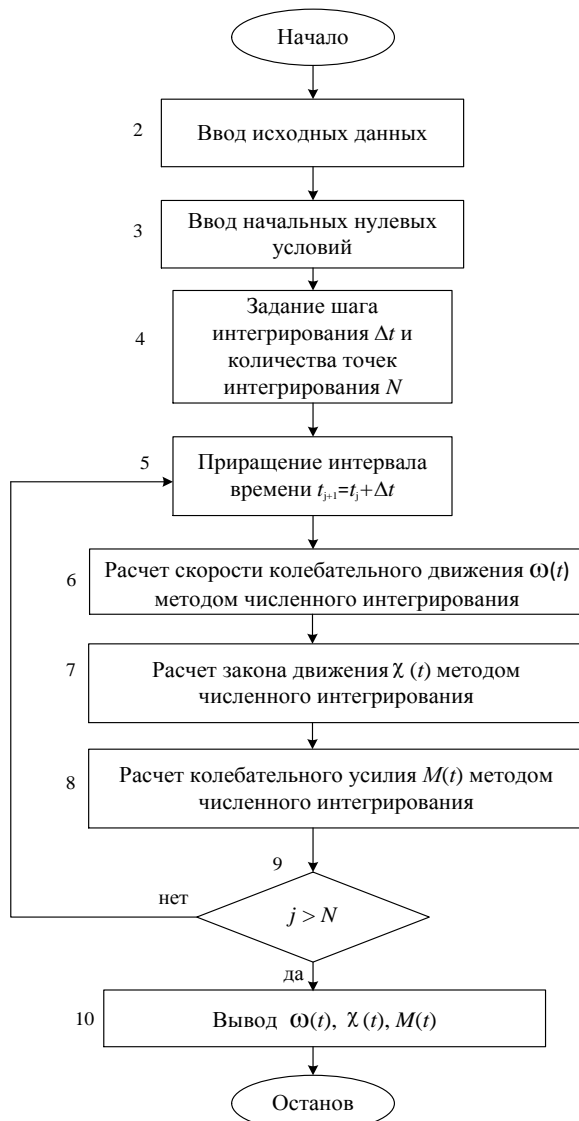


Рис. 3. Алгоритм расчета математической модели

$$\begin{bmatrix} t_{j+1} \\ \omega_{j+1} \\ \chi_{j+1} \\ M_{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_j + \Delta t, \\ \omega_j + \Delta t \frac{p}{J} \left[ I_1 L_m \sin(\omega'_1 t_j + \alpha') (-I_3 \sin(\omega'_3 t_j + \gamma) \sin(\theta_j) + I_4 \cos(\omega'_4 t_j + \phi) \sin(\Omega' t_j) \cos(\theta_j)) - \right. \\ \left. -L_m I_2 \cos(\omega'_2 t_j + \beta') \sin(\Omega' t_j) (I_3 \sin(\omega'_3 t_j + \gamma) \cos(\omega'_1 t_j) \sin(\Omega' t_j) \sin(\theta_j)) - R_g \omega_j - C_m \chi_j, \right] \\ \chi_j + \Delta t \omega_j, \\ I_1 L_m \sin(\omega'_1 t_j + \alpha') (-I_3 \sin(\omega'_3 t_j + \gamma) \sin(\theta_j) + I_4 \cos(\omega'_4 t_j + \phi) \sin(\Omega' t_j) \cos(\theta_j)) - \\ -L_m I_2 \cos(\omega'_2 t_j + \beta') \sin(\Omega' t_j) (I_3 \sin(\omega'_3 t_j + \gamma) \sin(\theta_j) + I_4 \cos(\omega'_4 t_j + \phi) \sin(\Omega' t_j) \cos(\theta_j)), \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Таблица 4

Параметры схемы замещения МДП

Относительные величины при $\Omega = 0,02$ о.е. или 6,28 рад/с										
$R_{as}$	$R_{\beta s}$	$R_{ar}$	$R_{\beta r}$	$L_{as}$	$L_{\beta s}$	$L_{ar}$	$L_{\beta r}$	$L_m$	$J$	
0,065	0,063	0,097	0,096	0,017	0,015	0,027	0,03	0,0559	0,028	

На основе системы (9) был исследован ряд специальных режимов работы вибрационного электропривода (рис. 6, 7), для которого характерны: колеба-

магнитных полей статора и ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\Omega'$  – относительное значение частоты колебаний полей относительно друг друга;  $\chi$  – закон изменения подвижного элемента МДП.

Исследования динамических режимов работы МДП проводились на базе асинхронного кранового двигателя с фазным ротором типа 4АК160S8У3 со степенью защиты IP44 и синхронной частотой вращения, равной  $n_0 = 750$  об/мин, мощностью  $P_2 = 5,5$  кВт [13] с доработками со стороны ротора. Параметры исследуемого двигателя представлены в табл. 2.

Расчетные базовые значения и параметры схемы замещения МДП с учетом влияния частоты колебания  $\Omega'$  на параметры приведены в табл. 3 при угловой частоте колебаний  $\Omega = 6,28$  рад/с.

### Результаты

В качестве результатов моделирования представим временные зависимости (рис. 4): закона изменения координаты подвижного элемента  $\chi = f(t)$ , угловой скорости  $\omega = f(t)$  и электромагнитного момента МДП  $M_{эм} = f(t)$  при пуске двигателя на частоту  $\Omega' = 0,1$  о.е. при реализации колебательного режима работы.

Кроме того, при реализации колебаний (вне зависимости от режима работы) была применена косинусоидально-частотная токовая модуляция (7), обеспечивающая наиболее плавную развертку частоты [18], поэтому было исследовано влияние амплитуды питающих токов статора по оси  $\alpha$  на динамические показатели вибрационного электропривода (колебательный режим работы), а именно: ударных значений электромагнитного момента и времени переходного процесса (рис. 5).

Следует отметить, что наибольшее влияние изменение относительной амплитуды питающих токов статора  $i_{as}$  оказывает на время переходного процесса и имеет явно выраженный экспоненциальный характер.

тельный, колебательно-вращательный, а также полигармонический режимы.

На зависимостях (см. рис. 6, 7) приняты следующие обозначения: 1 – колебательный режим работы МДП при согласном включении; 2, 3 – колебательно-вращательный режим работы МДП при создании колебательного поля со стороны статора и ротора соответственно; 4 – полигармонический режим работы МДП с кратной частотой.

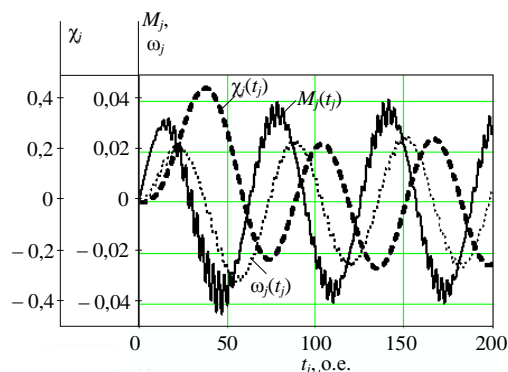


Рис. 4. Закон изменения координаты подвижного элемента, скорости и момента МДП при пуске двигателя на частоту  $\Omega' = 0,1$  о.е. при реализации колебательного режима работы

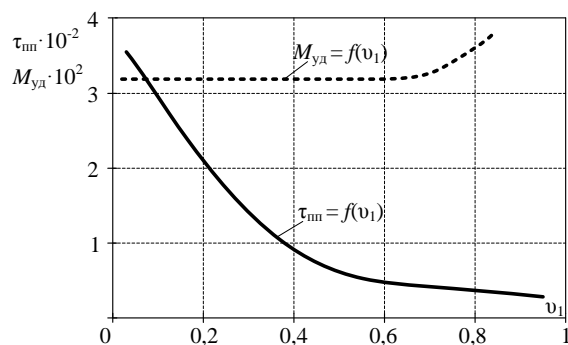


Рис. 5. Зависимости ударного электромагнитного момента МДП и времени переходного процесса от амплитуды тока обмотки статора  $i_{ас}$  при модулирующей частоте  $\Omega = 0,1$  о.е.

В качестве параметров нагрузки выступают: суммарный момент инерции нагрузки  $J_n$ , коэффициент демпфирующего момента нагрузки  $R_g$ , к исследуемым параметрам отнесём такие, как время переходного процесса  $\tau_{пн}$ , ударные значения электромагнитного момента МДП  $M_{уд}$ , установившиеся значения угловой скорости вращения поля двигателя  $\omega_{уст}$  и установившиеся значения амплитуды закона движения вала двигателя  $\chi_m$ . Все вышеобозначенные, параметры приведены в относительных единицах.

Приведем практические рекомендации по реализации специальных режимов работы силового вибрационного электропривода, в состав которого входит МДП (табл. 5).

При увеличении суммарного момента инерции нагрузки  $J_n$  общий характер времени переходного процесса можно охарактеризовать как стабильное увеличение с явно выраженным экспоненциальным характером в случае полигармонического и колебательного режимов работы (рис. 6, а, кривые 1, 4).

Увеличение коэффициента демпфирующего момента нагрузки  $R_g$  в заданных пределах (см. рис. 6, б) приводит к наличию резонансных явлений (см. рис. 6, б, кривые 1–3) для всех режимов работы силового электропривода, кроме полигармонического. Кроме того, следует отметить, что точки резонанса не одинаковы и самое большое значение  $R_g = 4$  коэффициента демпфирующего момента нагрузки имеет место для колебательного режима работы

МДП. Согласно работам [1, 15] наличие резонансных явлений при изменении данного параметра говорит о том, что необходимо более детально рассматривать вопрос динамической устойчивости при резком увеличении инерционных масс, так как происходит смещение динамической нейтральной колебаний.

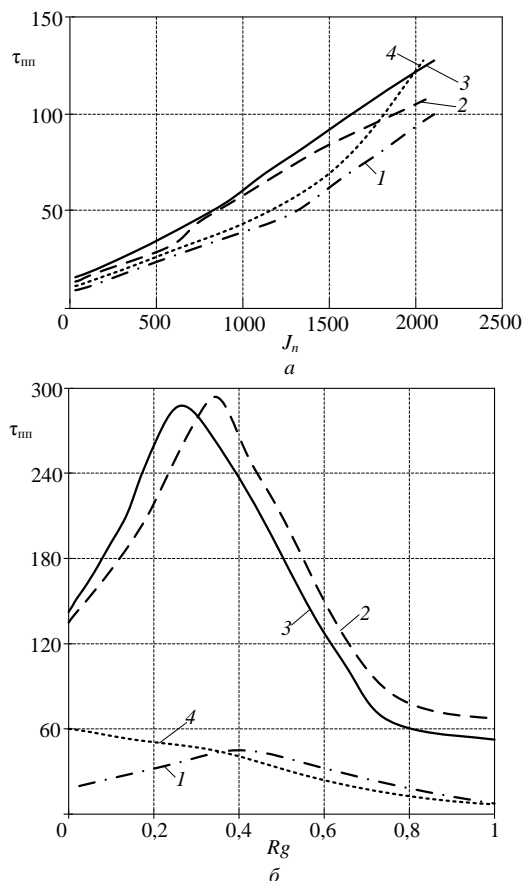


Рис. 6. Зависимость времени переходного процесса  $\tau_{пн}$  от: а – момента инерционной нагрузки  $J_n$ ; б – коэффициента демпфирующего момента нагрузки  $R_g$

Исследования показали, что наибольшее влияние на установившиеся значения амплитуды закона изменения подвижного элемента исполнительного двигателя  $\chi_m$  имеет суммарный момент инерции нагрузки  $J_n$  (рис. 7). Значения  $\chi_m$  уменьшаются с увеличением параметра  $J_n$  по экспоненциальному закону во всех случаях (кривые 2–4), кроме колебательного. Следует отметить, что при формировании колебательного поля со стороны ротора при реализации колебательно-вращательного режима работы изменение исследуемого параметра происходит в отрицательной области.

Также следует отметить, что немаловажным параметром нагрузки является коэффициент позиционной нагрузки  $C_m$ , но исследования показали, что только в колебательном режиме работы электропривода вибростола необходимо учитывать точки резонансных явлений, которые отвечают за устойчивость работы привода. Во всех остальных рассмотренных случаях специальных режимов работы МДП данный параметр не влияет на динамические показатели



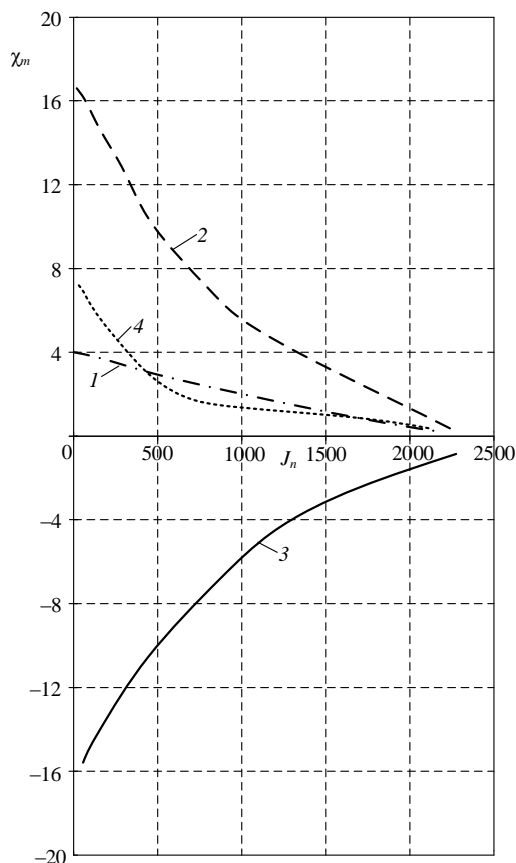


Рис. 7. Зависимость установившегося значения амплитуды закона изменения подвижного элемента двигателя  $\chi_m$  от момента инерции нагрузки  $J_n$

вибропривода. Поэтому данные кривые здесь не приводим.

### Выводы

1. Наиболее востребованным способом формирования заданных колебаний в электроприводе вибросистем является косинусоидально-частотный, так как при частотной модуляции закон движения поля близок к синусоидальному.

2. Анализ влияния параметров нагрузки на динамические показатели электропривода вибростола показал, что необходимо комплексно воздействовать на них, так как одностороннее воздействие ведет либо к увеличению времени переходного процесса  $\tau_{\text{пн}}$  (при увеличении суммарного момента инерции нагрузки  $J_n$ ) и уменьшению установившихся значений амплитуды закона изменения подвижного элемента двигателя  $\chi_m$  – в 12 раз по сравнению с номинальными значениями, либо, напротив, к уменьшению первого ( $\tau_{\text{пн}}$ ) и возникновению резонансного пика во всех рассмотренных режимах работы электропривода вибростола, кроме полигармонического.

3. Практическое применение специальных режимов работы для вибрационных силовых электроприводов с МДП возможно при условии, что частота колебаний будет кратна 5 Гц, так как кратность частот основной  $\omega$  и модулированной  $\Omega$  должна иметь в результате рациональное число, потому что от этого зависит устойчивость системы, а амплитуды питающих токов не должны отличаться более чем на 25% от номинального значения в обе стороны.

Таблица 5

### Алгоритм формирования специальных режимов работы для силового вибрационного электропривода

Режим работы исполнительного двигателя (МДП)	Коэффициенты сигнала, $v_i$ , о.е.	Угловая частота вращения магнитных полей обмоток, $\omega_i$	Фазовый сдвиг, рад	Развертка частоты	Технологический процесс
Колебательный	$v_1 = v_2 = 1,$ $v_3 = v_4 = 1,225$	$\omega_1 = \omega_2 = \omega,$ $\omega_3 = \omega_4 = \omega'$	$\alpha' = \beta' = \gamma =$ $= \varphi = 0$	Синусоидальная балансная амплитудная, косинусоидальная частотная	Виброуплотнение грунтов, вибролитьё
Колебательно-вращательный	$v_1 = v_2 = 1,$ $v_3 = v_4 = 1,225$	$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega,$ $\omega_4 = \omega'$	$\alpha' = \beta' = \gamma =$ $= 0,$ $\varphi = \pi/2$	Линейная фазовая	Вибрационная транспортировка руды
Полигармонический	$v_1 = v_2 = 1,$ $v_3 = v_4 = 1,225$	$\omega_1 = \omega_3 = \omega,$ $\omega_2 = \omega', \omega_4 = \omega''$	$\alpha' = \beta' = \gamma =$ $\varphi = 0$	Синусоидальная балансная амплитудная	Вибрационная сортировка угля, первичное дробление угля, виброкалибровка оборудования
	$v_1 = v_2 = 1,$ $v_3 = v_4 = 1,225$	$\omega_1 - \omega_2 = \omega_3 - \omega_4$ частота не кратна 5 Гц	$\alpha' = \beta' = \gamma =$ $= \varphi = 0$	Косинусоидальная частотная	
	$v_1 = v_2 = 1,$ $v_3 = v_4 = 1,225$	$\omega_2 - \omega_1 = \omega_4 - \omega_3$ частота кратна 5 Гц	$\alpha' = \beta' = \gamma =$ $= \varphi = 0$	Косинусоидальная частотная	

### Литература

1. Aristov A.V. Voltage Converter with the Controlled Energy Balance For the Electric Drive with the Pulsation Motion Mode / A.V. Aristov, V.O. Nagorniy, A.M. Gavrilov // Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON. – 2015. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7146983> (дата обращения: 29.01.2020).

2. Пат. 2 592 080 РФ, МПК Н 02 Р 25/02. Электропривод колебательно-вращательного движения / А.В. Аристов (РФ), И.А. Эккерт (РФ). – № 2 015 109 442 / 07, заявл. 17.03.15; опубл. 20.07.16, Бюл. № 20. – 5 с.

3. Use of Creeping Speed Mode in Discrete Control and Measuring Equipment with Digital-program Control / L. Payuk, N. Voronina, S. Korepanov, O. Galtseva, N. Natalinova // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 79. – URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167901060> (дата обращения: 25.02.2019).

4. Пат. на полезную модель 88 874 РФ, МПК Н 02 Р 7/00. Устройство для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме прерывистого движения / А.В. Аристов (РФ), Н.А. Воронина (РФ). – № 2 009 125 766 / 22; заявл. 06.07.09; опубл. 20.11.09, Бюл. № 32. – 8 с.

5. Пат. 90 277 РФ, МПК Н 02 Р 7/00. Электропривод колебательного движения / А.В. Аристов (РФ), Л.А. Паюк (РФ). – № 2 009 125 765 / 22; заявл. 06.07.09; опубл. 27.12.09, Бюл. № 36. – 7 с.

6. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения / В.И. Луковников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

7. Луковников В.И. Энергетические показатели асинхронных короткозамкнутых электродвигателей колебательного режима работы и пути их повышения / В.И. Луковников, В.В. Тодарев, Л.В. Веппер // Вестник Гомельского гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2000. – № 1. – С. 33–37.

8. Пат. на полезную модель 95 323 РФ, МПК В 81 В 3/00. Электромеханизм / Д.Ю. Ляпунов (РФ). – № 2 010 108 272 / 22; заявл. 05.03.10; опубл. 27.06.10, Бюл. № 18. – 7 с.

9. An Asynchronous Electric Drive with the Indirect Control of the Output Variables / A.V. Glazachev, Y.N. Dementiev, I.V. Rakov, A.D. Umurzakova // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 91. – URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179101039> (дата обращения: 13.05.2019).

10. Литвин В. Колебательный режим линейного асинхронного двигателя в приводе зерноочистительной машины / В. Литвин, Ф. Мамедов, А. Сафонов // Научные труды Русунского ун-та (Русе, Болгария). – 2009. – Т. 48, сер. 3.1. – С. 31–34.

11. Смирнов А.О. Обеспечение устойчивой работы частотно-управляемого асинхронного электропривода при низких температурах окружающей среды / А.О. Смирнов, В.Г. Букреев, А.Э. Зубреков // Изв. высш. учеб. завед. Электромеханика (Новочеркасск, Ростовская обл.). – 2016. – № 4. – С. 41–48.

12. Payuk L.A. Energy Characteristics of Electric Drive of Oscillatory Motion at the Shock-Free Start / L.A. Payuk, N.A. Voronina, O.V. Galtseva // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 671/ – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/671/1/012044> (дата обращения: 05.05.2019).

13. Special Modes of AC Drives Operation in the Mining Industry / L. Payuk, N. Voronina, O. Galtseva, D. Zhang, A. Rogachev // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 15. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171503014> (дата обращения: 08.05.2019).

14. Петров И.И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода / И.И. Петров, А.М. Мейстель. – М.: Энергия, 1968. – 264 с.

15. Грачев С.А. Безредукторный электропривод периодического движения / С.А. Грачев, В.И. Луковников. – Минск: Высшая школа, 1991. – 160 с.

16. Рудченко Ю.А. Проблемы теории и практики безредукторных электроприводов периодического движения / Ю.А. Рудченко, А.В. Козлов, А.А. Толстенков // Вестник Белорусско-Российского ун-та (Могилёв, Беларусь). – 2011. – № 4 (33). – С. 129–137.

17. Yudinsev A. Mathematical simulation of oscillating electric drives in current-frequency modulation / A. Yudinsev, A. Aristov // Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Young Scientists: Modern Technique and Technologies. – 2002. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1213746> (дата обращения: 27.03.2020).

18. Аристов А.В. Формирование шагового режима работы асинхронного двигателя при потенциальной амплитудно-балансной модуляции / А.В. Аристов, И.А. Эк-керт // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1(31). – С. 217–221.

#### Паюк Любовь Анатольевна

Канд. техн. наук, ст. преп. отделения электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ) Инженерной школы энергетики (ИШЭ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-903-955-83-34  
Эл. почта: lubara81@mail.ru

#### Воронина Наталья Алексеевна

Канд. техн. наук, доцент ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID 0000-0001-9327-6441  
Тел.: +7-913-850-16-60  
Эл. почта: voronina@tpu.ru

#### Ляпунов Данил Юрьевич

Канд. техн. наук, доцент ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID 0000-0001-9326-3595  
Тел.: +7-903-913-61-37  
Эл. почта: lyapunov@tpu.ru

Payuk L.A., Voronina N.A., Lyapunov D.Yu.

#### Special Modes of Vibratory Electric Drive

The paper deals with the algorithm of the supply voltages and currents for special modes of operation of vibrating actuators being the most common type of vibratory electric drive. A special feature of the electric drive under consideration is the double-fed electric machine (DFEM) being a drive motor for the vibrating system. It is demonstrated, that for DFEM operating in the oscillatory, vibrational-rotational and polyharmonic modes, the best performance shows an electric drive with cosine frequency modulated control signal. A mathematical model of the DFEM has been developed, that allows investigating various operating modes of vibration equipment. The evidences for practical relevance for the vibration drives for various applications are provided. The methods to estimate the way the load parameters affect the dynamic performance of the motor drive are used. The effect of power supply and load parameters on the dynamic performance of the DFEM and some practical recommendations are outlined.

**Keywords:** template, component, formatting, style, correct way to use the styles.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-122-130

#### References

1. Aristov A.V. Voltage Converter with the Controlled Energy Balance For the Electric Drive with the Pulsation Motion Mode / A.V. Aristov, V.O. Nagorniy, A.M. Gavrilov // *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON*, 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7146983> (Accessed: January 29, 2020).

2. Aristov A.V., Ekkert I.A. Elektroprivod kolebatel'no-vraschatel'nogo dvizheniya [Electric drive of oscillatory and rotary motion]. Patent RF, no. 2592080, 2016.

3. Use of Creeping Speed Mode in Discrete Control and Measuring Equipment with Digital-program Control / L. Payuk, N. Voronina, S. Korepanov, O. Galtseva, N. Natalina // *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 79. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167901060> (Accessed: February 25, 25.02.2019).

4. Aristov A.V., Voronina N.A. Ustroystvo dlya upravleniya dvuhfaznym asinhronnym dvigatelem v rezhime previstogo dvizheniya [A device for control of two-phase asynchronous motor in the mode of interruptive moving]. Patent RF, no. 88874, 2009.
5. Aristov A.V., Payuk L.A. Elektroprivod kolebatel'nogo dvizheniya [Oscillatory Electric Drive]. Patent RF, no. 90277, 2009.
6. Lukovnikov V.I. *Elektroprivod kolebatel'nogo dvizheniya* [Oscillatory Electric Drive]. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 152 p. (in Russ.).
7. Lukovnikov V.I., Todarev V.V., Vepper L.V. [Energy indicators of the squirrel cage asynchronous motors of oscillatory operating mode and methods of their improvement]. *Bulletin of Gomel State Technical University named after P.O. Suhoy*, 2000. no. 1, pp. 33–37 (in Russ.).
8. Lyapunov D.Y. Electromehanizm [Electromechanism]. Patent RF, no. 95323, 2010.
9. Glazachev A.V., Dementiev Y.N., Rakov I.V., Umurzakova A.D. An Asynchronous Electric Drive with the Indirect Control of the Output Variables // *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 91. URL: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/20179101039> (Accessed: May 13, 2019).
10. Litvin V., Mamedov F., Safonov A. [Oscillatory mode of the linear asynchronous motor for the grain-cleaning machine]. *Proceedings of University of Ruse*, 2009, vol. 48, part 3.1, pp. 31–34 (in Russ.).
11. Smirnov A.O., Bukreev V.G., Zubrekov A.E. [Providing stable operation of variable frequency electric drive at low ambient temperatures]. *Bulletin of Higher Education Institutions: Electromechanics*, 2016, no. 4, pp. 41–48 (in Russ.).
12. Payuk L.A., Voronina N.A., Galtseva O.V. Energy Characteristics of Electric Drive of Oscillatory Motion at the Shock-Free Start // *Journal of Physics*, 2016, vol. 671, URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/671/1/012044> (Accessed: May 05, 05.05.2019).
13. Payuk L., Voronina N., Galtseva O., Zhang D., Rogachev A. Special Modes of AC Drives Operation in the Mining Industry // *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 15. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171503014> (Accessed: May 08, 2019).
14. Petrov I.I., Meystel' A.M. *Spetsial'nye rezhimy raboty asinhronnogo elektroprivoda* [Special operating modes of the asynchronous electric drive]. Moscow, Energiya, 1968. 264 p. (in Russ.).
15. Grachev S.A., Lukovnikov V.I. *Bezreduktorniy elektroprivod periodicheskogo dvizheniya* [Gearless electric drive of periodical motion]. Minsk, Vysshaya shkola, 1991. 160 p. (in Russ.).
16. Rudchenko Y.A., Kozlov A.V., Tolstenkov A.A. [Problems of theory and implementation of the gearless electric drives of oscillatory motion]. *Bulletin of Belorussian and Russian University*, 2011, no. 4 (33), pp. 129–137 (in Russ.).
17. Yudintsev A., Aristov A. Mathematical simulation of oscillating electric drives in current-frequency modulation // *Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Young Scientists: Modern Technique and Technologies*, 2002. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1213746> (Accessed: March 27, 2020).
18. Aristov A.V. [Step operating mode formation of the asynchronous motor with the potential amplitude modulation]. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 1 (31), pp. 217–221 (in Russ.).

---

#### Lubov A. Payuk

Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer,  
School of Energy & Power Engineering,  
Division for Power and Electrical Engineering  
National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-903-955-83-34  
Email: lubapa81@mail.ru

#### Natalya A. Voronina

Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer,  
School of Energy & Power Engineering,  
Division for Power and Electrical Engineering, TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID 0000-0001-9327-6441  
Phone: +7-913-850-16-60  
Email: voronina@tpu.ru

#### Danil Yu. Lyapunov

Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer,  
School of Energy & Power Engineering,  
Division for Power and Electrical Engineering, TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID 0000-0001-9326-3595  
Phone: +7-903-913-61-37  
Email: lyapunov@tpu.ru



# Требования к подготовке рукописей статей,

представляемых для публикации в журнале

«Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»

1. Электронный вариант статьи должен быть представлен в виде файла, названного по-русски фамилией первого автора, на дискете или диске в формате Word 2003–2016. Предпочтительнее представить его по электронной почте.

2. Оригинал на бумажном носителе должен полностью соответствовать электронному варианту.

3. Статья должна иметь (в порядке следования): УДК; И.О. Фамилии авторов; заглавие; аннотация (не реферат); ключевые слова; основной текст статьи; список библиографий под подзаголовком «Литература»; сведения об авторах; далее на английском языке: Фамилии авторов И.О., заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова. Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, электронный адрес.

4. Текст статьи должен быть размещен в две колонки без принудительных переносов через один интервал шрифтом Times New Roman 10 кегля на одной стороне листа белой писчей бумаги формата А4, без помарок и вставок. Для облегчения форматирования прилагается **шаблон статьи**, который размещен на сайте: [journal.tusur.ru](http://journal.tusur.ru). Размер статьи со всеми атрибутами должен быть, как правило, не более пяти страниц.

5. Одни и те же символы в тексте, формулах, таблицах и рисунках должны быть единообразными по написанию. Русские буквы и греческие символы набираются прямым шрифтом, а переменные, обозначенные латинскими – курсивом, кроме слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул.

6. Формулы должны быть набраны в формульном редакторе (MathType) программы Word. Русские буквы, греческие символы, математические знаки (+, –, ×, ∈, =, скобки, ...) и цифры всегда набираются прямым не жирным шрифтом, а переменные (и кривые на графиках), обозначенные латинскими буквами или цифрами – курсивом, кроме англ. слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул (const, input;  $\sin x(t_1)$ ;  $U_{in}$ ;  $I_{вх}$ ;  $T_z$ ;  $\beta_2$ ;  $H_2O$ , Adobe Acrobat, Cisco и т.д.); векторные величины – жирным, прямо (не курсив) –  $A_1$ ,  $M(f)$ ,  $\beta_x$ . Шаблоны для набора формул необходимо взять на сайте из шаблона статьи.

7. Все употребляемые обозначения и сокращения должны быть пояснены.

8. Единицы измерения физических величин должны соответствовать Международной системе единиц (СИ) и написаны по-русски через пробел (х, ГГц; 20 ГГц;  $T$ , град;  $7^\circ C$ ). Десятичные числа пишутся через запятую (не точку).

9. Таблицы и рисунки должны иметь тематические заголовки (не повторяющие фразы-ссылки на них в тексте). (Рис. 1. Название рисунка; Таблица 1.

Название таблицы). Большие блоки расшифровки условных обозначений лучше приводить в тексте. Подписи и надписи на рис. – Times New Roman, 9 пт (после масштабирования), не жирным, не курсивом, переменные – так же как и в тексте. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте (... на рис. 3, ... в табл. 2).

10. Рисунки и фотографии должны быть **черно-белыми**, четкими, контрастными, аккуратными, сгруппированными. Графики – не жирно, сетка – четко. Единицы измерения – на русском. Десятичная запятая (не точка). Рисунки могут быть выполнены в программах CorelDraw, Illustrator, Word, Visio и должны давать возможность внесения исправлений.

11. Иллюстрации, должны быть разрешением не менее 600 dpi. Масштаб изображения – 8 или 16,7 см по ширине (при условии читаемости всех надписей, выполненных шрифтом Times New Roman, после масштабирования – 9 кегль).

12. На все источники, указанные в списке литературы, должны быть ссылки по тексту (нумерация в порядке упоминания, например, [1, 2], [5–7]). Описание источников должно соответствовать ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008 и содержать всю необходимую для идентификации источника информацию, а именно: *для неперiodических изданий* – фамилию и инициалы автора, полное название работы, место издания, название издательства, год издания, количество страниц; *для периодических изданий* – фамилию, инициалы автора, полное название работы, название журнала, год выпуска, том, номер, номера страниц (см. примеры оформления библиографий).

Бумажный вариант рукописи статьи должен быть подписан авторами и (для сторонних авторов) иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Материальные претензии авторов, связанные с распространением материалов их статей после опубликования, не принимаются.

Авторы несут полную ответственность за содержание статей и за последствия, связанные с их публикацией.

## Контактная информация

Адрес: 634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Эл. почта: [vnmas@tusur.ru](mailto:vnmas@tusur.ru). Тел.: +7 (382-2) 51-21-21

