

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Доклады ТУСУР. 2018 • Том 21, № 3

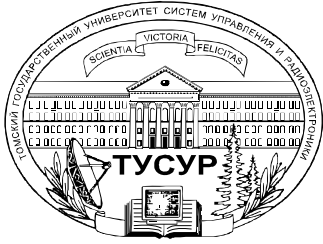
ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

2018 • Том 21, № 3



9 771818 044708 02007



Министерство образования и науки Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
2018, том 21, № 3**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Редакционная коллегия:

А.А. Шелупанов, д.т.н., проф., ректор, ТУСУР, почётный работник науки и техники РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования, лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2393-6701> (*гл. редактор*).

В.М. Рулевский, к.т.н., проректор по научной работе и инновациям, ТУСУР, НИИ АЭМ ТУСУРа, Томск, Россия (*зам. гл. редактора*).

В.Н. Маслеников, к.т.н., доцент, ТУСУР, Томск, Россия (*ответственный 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 (Brown Ian G.), 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., зав. каф. автоматизации обработки информации, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, почётный работник ВПО РФ, Томск, Россия.

В.М. Исаев, д.т.н., первый заместитель директора, Мытищинского 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 (Melikyan Vazgen Shavarsh), 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>.

Р.В. Мещеряков, д.т.н., проф., проф. РАН, зав. лаб. № 80 «Киберфизические системы», главный научный сотрудник ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН» (ИПУ РАН), лауреат Премии Правительства РФ в области образования Москва, Россия.

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>.

С.Г. Псахье, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, директор, Институт физики прочности и материаловедения (ИФПМ) СО РАН, Томск, Россия. <https://orcid.org/0000-0002-3447-0487>.

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., проф., директор департамента образования, ТУСУР, почётный работник ВПО РФ, почётный работник науки и техники РФ, 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. Шурягин, д.т.н., проф., директор департамента управления и стратегического развития, ТУСУР, научный руководитель, НИИ АЭМ ТУСУР, зав. кафедрой компьютерных систем в управлении и проектировании, заслуженный деятель науки РФ, почётный работник ВПО 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) 51-22-43

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

Подписной 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 25.09.2018.

Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 12. Тираж 500. Заказ 32.

Содержание

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Масалов Е.В., Кривин Н.Н., Кокоулин К.В. Анализ изменчивости линейного деполяризационного отношения при радиолокационном зондировании неоднородной среды, заполненной гидрометеорами.....	7
Безпальный А.Д., Шандаров В.М., Мандель А.Е. Канальные волноводные структуры, оптически индуцированные в кристаллах ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем	14

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Щерба Е.В., Никонов В.И., Литвинов Г.А. Обеспечение безопасности протоколов маршрутизации для телекоммуникационных сетей с динамической топологией.....	19
Буханов Д.Г., Сулохин Д.В. Выявление вредоносного программного обеспечения на основе классификации графов потоков исходных кодов	30
Чуйков А.В., Вульфин А.М., Васильев В.И. Нейросетевая система преобразования биометрических признаков пользователя в криптографический ключ.....	35
Чемерилов В.В., Фадеев А.С. Система автоматического разрешения омографии на основе семантической связи слов смежных предложений в текстовом отрывке	42
Погребной А.В. Выделение общей части в версиях исходного кода программ, представленного графовой моделью	49
Зеленский А.А., Письменкова М.М., Воронин В.В. Алгоритм поиска изображений в виде хэш-функций на основе глубоких нейросетевых технологий	57
Зеленский А.А., Семенищев Е.А., Франц В.А. Алгоритм определения формы объектов по анализу изображений, полученных в инфракрасном диапазоне .	63
Грибанова Е.Б., Логвин И.Н., Ширенков И.В. Алгоритм оценки маркетинговых мероприятий онлайн-социальной сети «ВКонтакте» на основе каскадной модели распространения информации.....	69
Харитонов В.А., Кривогилина Д.Н. Системные связи компонентов управления ассортиментом строительных материалов.....	75

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Рулевский В.М., Букреев В.Г., Шандарова Е.Б. Аппроксимация нелинейной математической модели системы электропитания глубоководного аппарата	85
Шкуратов А.В., Петровский А.В. Формирователь аналоговых вольт-амперных характеристик для имитатора солнечной батареи.....	93
Нестеришин М.В., Козлов Р.В., Журавлев А.В. Сравнительный анализ энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с параллельным и последовательным регулятором мощности солнечной батареи.....	98
Якимовский Д.О., Положенцев Д.С. Джукич Д.Й. Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса	103
Поляков М.В., Дмитриенко А.С., Завьялова О.Ю., Лянзбург В.П., Гладышев Г.Н., Балковой Н.Н. Современное состояние и перспективы развития управляющих двигателей-маховиков	109
Поляков М.В., Липовцев А.А., Алексанов П.А. Математическая модель гибкого несимметричного ротора электродвигателя-маховика с активным магнитным подвесом	115
Пасько В.А., Сосин А.А., Лянзбург В.П. Преобразование частоты вращения двигателя-маховика в код	121

СООБЩЕНИЯ

Ермаков В.В., Сарьян В.К. Развитие исследований по применению новых информационных технологий в экологическом мониторинге и биогеохимии.....	129
Требования	135

Editorial board

Alexander A. Shelupanov	Editor in Chief, Rector of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
Viktor M. Rulevskiy	Deputy Editor in Chief, Vice-Rector for Research and Innovations of TUSUR University, Candidate of Engineering, Director of the Research Institute of Automation and Electromechanics (SRIAEM) TUSUR.
Viktor N. Maslennikov	Executive Secretary of the Editor's Office, Candidate of Engineering.
Mikhail P. Batura	Chief Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), Doctor of Engineering, Professor.
Boris A. Belyaev	Head of the Electrodynamics Department, Institute of Physics SB RAS (Krasnoyarsk), Doctor of Engineering.
Ian G. Brown	PhD in Plasma Physics, Lawrence Berkeley National Laboratories (California USA).
Sergei A. Gavrilov	Vice Rector for Research of the National Research University of Electronic Technology (MIET, Moscow), Doctor of Engineering, Professor.
Yury P. Ekhlakov	Head of the Department of Data Processing Automation of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
Vyacheslav M. Isaev	First Deputy Director of the Mytishchi Research Institute of Radio Measurement Instruments, Doctor of Engineering.
Anatoly V. Kobzev	Professor of the Department of Industrial Electronics of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
Anatoly M. Korikov	Head of the Department of Automated Control Systems of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
Yury N. Kulchin	Director of the Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok), Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics.
Vazgen Sh. Melikyan	Director of the Academic Department of Synopsis Armenia (Yerevan, Armenia), Correspondent Member of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Engineering, Professor.
Roman V. Meshcheryakov	Head of the Laboratory No. 80 of the «Cyberphysical Systems», chief research officer of the Federal State Budgetary Institution of Science «Institute of Control Sciences named after V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences» (Moscow), Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences.
Yefim M. Oks	Head of the Department of Physics of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
Eduard D. Pavlygin	First Deputy General Director for Research of Federal Research-and-Production Center JSC R&P Mars, Candidate of Engineering.
Sergey G. Psakhie	Director of Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Head of the Laboratory of Computer-Aided Design of Materials (ISPMS SB RAS), Correspondent Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
Nikolay A. Ratakhin	Director of Institute of High Current Electronics SB RAS, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics.
Vilyam K. Saryan	Scientific Adviser at the Research Institute of Radio (Moscow), Academician of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Engineering, Professor.
Ansar R. Safin	Associate Professor, Department of Formation and Processing of Radio Signals, at the National Research University MPEI (Moscow), Candidate of Engineering.
Pavel E. Troyan	Vice-Rector for Academic Affairs, Head of Department of Physical Electronics, Doctor of Engineering, Professor.
Vladimir V. Shaidurov	Director of the Institute of Computational Modeling SB RAS (Krasnoyarsk), Correspondent Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
Stanislav M. Shandarov	Head of the Department of Electronic Devices of TUSUR University, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
Yury A. Shurygin	First Vice-Rector of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.

Contents
ELECTRONICS, MEASUREMENT TECHNOLOGY, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Masalov E.V., Krivin N.N., Kokoulin K.V. Analysis of the linear depolarization ratio variability in the radiolocation sensing of inhomogeneous medium filled with hydrometeors.....	7
Bezpaly A.D., Shandarov V.M., Mandel A.E. Channel waveguide structures optically induced in lithium niobate crystals with photorefractive surface layer.....	14

CONTROL, COMPUTER SCIENCE, AND INFORMATICS

Shcherba E.V., Nikonov V.I., Litvinov G.A. Securing Routing Protocols for Wireless Networks with Dynamic Topology.....	19
Bukhanov D.G., Sulokhin D.V. Detection of malware based on the classification of source code graphs.....	30
Chuikov A.V., Vulfin A.M., Vasilyev V.I. Neural network system for converting the user biometric characteristics into a cryptographic key.....	35
Chemerilov V.V., Fadeev A.S. System of automatic homography resolution based on the semantic connection words of adjacent sentences in a text passage.....	42
Pogrebnoy A.V. Finding common parts in software source code versions represented by graph models.....	49
Zelensky A.A., Pismenskova M.M., Voronin V.V. Algorithm for image retravel in the space of hash functions based on the deep neural network technologies.....	57
Zelensky A.A., Semenishchev E.A., Franc V.A. Algorithm to find the shape of objects from the analysis of data obtained in the infrared range.....	63
Gribanova E.B., Logvin I.N., Shirenikov I.V. Algorithm for evaluating the marketing activities of the online social network Vkontakte based on the cascade model of information dissemination.....	69
Kharitonov V.A., Krivogina D.N. System communications of components in management of the construction materials assortment.....	75

ELECTRICAL ENGINEERING

Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Shandarova E.B. Approximation of a nonlinear mathematical model of the power system of a deep-sea apparatus.....	85
Shkuratov A.V., Petrovsky A.V. Analog base IV-former for Solar Array Simulator.....	93
Nesterishin M.V., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. Comparative analysis of energy efficiency of power conditioning units with parallel and serial Solar Array power regulators.....	98
Yakimovsky D.O., Polozhentsev D.S., Djukich D.Y. Increasing sensitivity of control moment gyroscope electric drive when operating at low rotational velocities.....	103
Polyakov M.V., Dmitrienko A.S., Zav'yalova O.Yu., Lyanzburg V.P., Gladyshev G.N., Balkovoy N.N. Reaction wheels: the state-of-the-art and perspectives.....	109
Polyakov M.V., Lipovtsev A.A., Aleksanov P.A. Mathematical model of a flexible asymmetrical rotor for active magnetic bearing reaction wheel.....	115
Pasko V.A., Sosin A.A., Lyanzburg V.P. Conversion of the flywheel speed into the code.....	121

MESSAGES

Ermakov V.V., Sarian V.K. Development of research on the application of new information technologies in environmental monitoring and biogeochemistry.....	129
Manuscript requirements	135

**ЭЛЕКТРОНИКА,
ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА,
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

УДК 621.396.41

Е.В. Масалов, Н.Н. Кривин, К.В. Кокоулин

Анализ изменчивости линейного деполаризационного отношения при радиолокационном зондировании неоднородной среды, заполненной гидрометеорами

Получены расчетные соотношения для оценки величины линейного деполаризационного отношения в точке приема радиолокационных сигналов. Это сделано с использованием компонент вектора Джонса собственного базиса однородного участка среды распространения и комплексного фазора рассеянного сигнала. При этом имеется в виду, что данный сигнал рассеивается вторым участком, который следует непосредственно за однородным участком; характеризуется анизотропными по поляризации свойствами и имеет угол ориентации собственного поляризационного базиса, отличный от угла ориентации собственного базиса однородного участка среды распространения. При этом анализируются изменения поляризационной структуры радиолокационного сигнала в процессе его распространения в указанной среде в зависимости от начального угла ориентации поляризационного базиса РЛС относительно собственного базиса однородного участка, величины степени анизотропии второго участка, угла ориентации собственного поляризационного базиса второго участка. Приводятся результаты расчетов величины линейного деполаризационного отношения в точке приема радиолокационного сигнала для осадков в виде дождя различной интенсивности. Полученные результаты анализируются.

Ключевые слова: поляризация, угол эллиптичности, угол ориентации эллипса поляризации, дифференциальное ослабление, дифференциальный фазовый сдвиг, угол ориентации поляризационного базиса однородного участка, степень поляризационной анизотропии, угол ориентации собственного поляризационного базиса анизотропного участка, линейное деполаризационное отношение.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-7-13

Под неоднородной средой распространения понимается воздушное пространство, заполненное частицами осадков: каплями дождя, частицами града, снежинками и состоящее из участка однородной среды и следующего за ним второго участка, отличающегося анизотропными свойствами [1, 2]. Под однородным участком среды следует понимать участок, заполненный частицами метеорообразований, имеющими одинаковую ориентацию и размеры, находящимися в одном и том же фазовом состоянии [1, 3, 4]. Базис такого участка среды является линейным [4].

В случае дистанционного зондирования метеорообразований с использованием метеорорадиолокатора поляризационная структура радиолокационных сигналов оказывается в значительной степени подвержена искажающему воздействию дифференциальных факторов среды (дифференциального ослабления $\Delta\alpha$ и дифференциального фазового сдвига $\Delta\Phi$) [3, 4]. Это обстоятельство существенно снижает эффективность идентификации анизотропного участка метеорообразования, расположенного на периферии от передней границы метеорообразования.

Кроме того, то обстоятельство, что угол ориентации собственного поляризационного базиса анизотропного участка среды, как правило, является отличным от ориентации базиса однородного участка среды, обуславливает многофакторность воздействия метеорообразований на поляризационную структуру радиолокационного сигнала. Указанные отличия угла ориентации базиса θ могут быть обусловлены как наличием поперечных (к трассе распространения) сдвигов ветра, так и наличием зон повышенного статического электричества (зон грозовой активности) [5].

Постановка задачи

Результаты оценки интенсивности осадков и алгоритмы распознавания опасных зон метеорообразований на основе поляризационных измерений с применением двух ортогональных линейных поляризаций [6, 7] и использовании существующих методик не позволяют учесть указанные выше факторы и вызывают затруднение при идентификации опасных участков метеорообразований (сдвиги ветра, зоны грозовой активности). Кроме того, весьма существенным оказывается многофакторное воздействие таких метеорообразований на поляризационную структуру радиолокационного сигнала. Указанное воздействие влияет:

- на величину угла β_n между измерительным базисом, связанным с РЛС, и собственным базисом первого (однородного) участка среды;
- величину угла θ между ориентацией поляризационного базиса второго (анизотропного по поляризации) участка и ориентацией первого (однородного) участка среды;
- степень поляризационной анизотропии второго участка среды μ .

Эти обстоятельства обуславливают необходимость поиска способов, позволяющих оценить значимость влияния указанных факторов на получаемые результаты измерения и определить характер изменчивости параметра $LDR(z)$, где z – длина трассы распространения радиолокационного сигнала в однородном участке среды, заполненной гидрометеорами.

Методика решения

Как известно, величина $LDR(z)$ определяется соотношением [8–11]

$$LDR(z) = 20 \cdot \lg \left(\left| \dot{E}_{Pxy}(z) \right| / \left| \dot{E}_{Pxx}(z) \right| \right), \quad (1)$$

где $\left| \dot{E}_{Pxy}(z) \right|$ – амплитуда сигнала, излученного с горизонтальной поляризацией и принятого с вертикальной; $\left| \dot{E}_{Pxx}(z) \right|$ – амплитуда сигнала, излученного и принятого с горизонтальной поляризацией.

Для нахождения указанных амплитуд целесообразно использовать подход, описанный в [4]. Данный подход основан на использовании методики определения компонент вектора Джонса [12] в собственном базисе среды распространения с последующим переходом в собственный базис РЛС. При этом анализируемые сигналы определяются на выходе прямоугольных волноводов, принимающих сигналы горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно. При этом согласно результатам работы [4] определение угла ориентации измерительного поляризационного базиса и определение угла ориентации собственного поляризационного базиса анизотропного участка целесообразно производить относительно поляризационного базиса однородного участка среды распространения, а оценку трансформации поляризационной структуры радиолокационного сигнала целесообразно проводить в собственном базисе однородного участка среды распространения.

Тогда комплексные амплитуды, необходимые для определения $LDR(z)$ в точке приема (расположение РЛС), могут быть определены из приведенных ниже выражений:

$$\dot{E}_{Pxx}(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \left[R^{-1}(\beta_H) \right] \left[R(\beta_P(z, \beta_H)) \right] \begin{bmatrix} \cos \alpha_P(z) \\ j \sin \alpha_P(z) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\dot{E}_{Pxy}(z) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left[R^{-1}(\beta_H) \right] \left[R(\beta_P(z, \beta_H)) \right] \begin{bmatrix} \cos \alpha_P(z) \\ j \sin \alpha_P(z) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) использованы следующие обозначения:

$\begin{bmatrix} \cos \alpha_P(z) \\ j \sin \alpha_P(z) \end{bmatrix}$ – вектор Джонса эллиптически поляризованной волны в базисе анизотропного участка;

$$\left[R(\beta_P(z, \beta_H)) \right] = \begin{bmatrix} \cos \beta_P(z, \beta_H) & \sin \beta_P(z, \beta_H) \\ -\sin \beta_P(z, \beta_H) & \cos \beta_P(z, \beta_H) \end{bmatrix} –$$

оператор перехода из базиса анизотропного участка в базис однородного участка среды;

$$\left[R^{-1}(\beta_H) \right] = \begin{bmatrix} \cos \beta_H & -\sin \beta_H \\ \sin \beta_H & \cos \beta_H \end{bmatrix} – оператор пере-$$

хода в базис локатора из базиса однородного участка среды;

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} – матрица Джонса прямоугольного вол-$$

новода, принимающего сигнал с горизонтальной поляризацией;

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} – матрица Джонса прямоугольного вол-$$

новода, принимающего сигнал с вертикальной поляризацией;

$\alpha_P(z)$ и $\beta_P(z)$ представляют собой значения угла ориентации эллипса поляризации и угла эллиптич-

ности эллипса поляризации соответственно, изменяющиеся в процессе распространения сигнала, рассеянного анизотропным участком, в однородном участке среды.

Для учета указанных выше факторов воспользуемся моделью среды распространения, когда зондирующий сигнал распространяется в однородной среде, а его рассеяние происходит анизотропным участком, заполненным гидрометеорами. В рамках предложенной модели неоднородной среды, для характеристики анизотропного участка метеообразования, целесообразно использовать матрицу рассеяния следующего вида [13]:

$$S = 0,5(\lambda_1 + \lambda_2) \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \right\}, \quad (4)$$

где λ_1, λ_2 – собственные числа матрицы рассеяния, $\lambda_1 > \lambda_2$; θ – угол ориентации собственного базиса метеообъекта относительно измерительного;

$\mu = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ – степень поляризационной анизотропии объекта.

Поскольку, как отмечается в работе [14], метеообразования являются объемными целями, образованными независимыми рассеивателями, то матрицу рассеяния (4), степень анизотропии μ , собственные значения матрицы λ_1, λ_2 и угол ориентации θ собственного базиса анизотропного участка следует понимать как совокупную матрицу рассеивания объемной метеоцели и ее характеристики ($\mu, \lambda_1, \lambda_2, \theta$).

Выражения, определяющие $\alpha_P(z)$ и $\beta_P(z)$, будут иметь следующий вид:

$$\alpha_P(z) = \frac{1}{2} \times \arcsin \left(\frac{2 \cdot 10^{0,05 \cdot \Delta \alpha z} \cdot \operatorname{tg} \gamma_{PH}(z) \cdot \sin(\varphi_{PH}(z) + \Delta \Phi z)}{1 + 10^{0,1 \cdot \Delta \alpha z} \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma_{PH}(z)} \right), \quad (5)$$

$$\beta_P(z) = \frac{1}{2} \times \operatorname{arctg} \left[\frac{2 \cdot 10^{0,05 \cdot \Delta \alpha z} \cdot \operatorname{tg} \gamma_{PH}(z) \cdot \cos(\varphi_{PH}(z) + \Delta \Phi z)}{1 - 10^{0,1 \cdot \Delta \alpha z} \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma_{PH}(z)} \right] + \frac{\pi n}{2}, \quad (6)$$

где $\operatorname{tg} \gamma_{PH}(z)$ – начальное значение модуля комплексного фазора рассеянной волны в зависимости от длины трассы распространения z ; $\varphi_{PH}(z)$ – начальное значение фазы комплексного фазора рассеянной волны.

Начальное значение комплексного фазора определяется с учетом матрицы рассеяния, представленной выше в виде [4]:

$$\operatorname{tg} \gamma_{PH}(z) = \left| \dot{E}_{yPH}(z) \right| / \left| \dot{E}_{xPH}(z) \right| = \frac{\left| S_{12} + S_{22} \cdot \left(\dot{E}_{y1}(z) / \dot{E}_{x1}(z) \right) \right|}{\left| S_{11} + S_{12} \cdot \left(\dot{E}_{y1}(z) / \dot{E}_{x1}(z) \right) \right|}. \quad (7)$$

Поскольку, как было указано выше, оценку трансформации поляризации сигнала, облучающего анизотропный участок, целесообразно проводить в собственном базисе однородного участка, то комплексный фазор $\dot{E}_{y1}(z)/\dot{E}_{x1}(z)$ облучающей этот участок волны может быть представлен согласно результатам работы [4] в виде

$$\frac{\dot{E}_{y1}(z)}{\dot{E}_{x1}(z)} = \text{tg} \gamma_1(z) \cdot e^{-j\varphi(z)}, \quad (8)$$

где

$$\text{tg} \gamma_1(z) = 10^{0,05 \cdot \Delta \alpha z} \cdot \text{tg} \beta_H, \quad (9)$$

а изменение фазы фазора $\varphi(z)$ в процессе распространения составляет величину

$$\varphi(z) = \Delta \Phi \cdot z. \quad (10)$$

Подставив значения S_j из формулы (4) и выражения (9) и (10) в формулу (7) и проведя необходимые преобразования, получим, что

$$\gamma_{PH}(z) = \arctg \left[\frac{2\mu \cdot \sin 2\theta \cdot (1 - \mu \cdot \cos 2\theta) \cdot \text{tg} \gamma_1(z) \cdot \cos \Delta \Phi z + \mu^2 \cdot \sin^2 2\theta + (1 - \mu \cdot \cos 2\theta)^2 \cdot \text{tg}^2 \gamma_1(z)}{2\mu \cdot (1 + \mu \cdot \cos 2\theta) \cdot \text{tg} \gamma_1(z) \cdot \sin 2\theta \cdot \cos \Delta \Phi z + (1 + \mu \cdot \cos 2\theta)^2 + \mu^2 \cdot \text{tg}^2 \gamma_1(z) \cdot \sin^2 2\theta} \right]^{0,5}. \quad (11)$$

Начальное значение фазы комплексного фазора рассеянной волны находится по формуле

$$\varphi_{PH}(z) = \xi_1(z) - \xi_2(z), \quad (12)$$

где $\xi_1(z) = \arg \dot{E}_{yPH}(z)$; $\xi_2(z) = \arg \dot{E}_{xPH}(z)$,

и будет определяться следующим выражением:

$$\varphi_{PH}(z) = \arctg \frac{\mu \cdot \sin 2\theta \cdot \text{tg} \gamma_1(z)}{(1 + \mu \cdot \cos 2\theta) + \mu \cdot \sin 2\theta \cdot \text{tg} \gamma_1(z)} \times \left(\frac{\sin \Delta \Phi z}{\cos \Delta \Phi z} \right) - \arctg \left(\frac{(1 - \mu \cdot \cos 2\theta) \cdot \text{tg} \gamma_1(z)}{(\mu \cdot \sin 2\theta + (1 - \mu \cdot \cos 2\theta) \cdot \text{tg} \gamma_1(z))} \times \frac{\sin \Delta \Phi z}{\cos \Delta \Phi z} \right). \quad (13)$$

Подставив значения $\gamma_{PH}(z)$ и $\varphi_{PH}(z)$, полученные по формулам (11) и (13), в формулы (5), (6) и используя полученные (после указанной подстановки) формулы (2), (3), получим выражения для амплитуды $|\dot{E}_{Pxy}(z)|$ сигнала, принятого с вертикальной поляризацией, и амплитуды $|\dot{E}_{Pxx}(z)|$ сигнала, принятого с горизонтальной поляризацией.

Осуществим перемножение в (2) и (3) и определим модули полученных произведений $|\dot{E}_{Pxx}(z)|$ и $|\dot{E}_{Pxy}(z)|$, тогда получим

$$|\dot{E}_{Pxy}(z)| = [\cos^2 \alpha_P(z) \cdot \sin^2(\beta_H - \beta_P(z, \beta_H)) + \sin^2 \alpha_P(z) \cdot \cos^2(\beta_H - \beta_P(z, \beta_H))]^{0,5}, \quad (14)$$

$$|\dot{E}_{Pxx}(z)| = [\cos^2 \alpha_P(z) \cdot \cos^2(\beta_H - \beta_P(z, \beta_H)) + \sin^2 \alpha_P(z) \cdot \sin^2(\beta_H - \beta_P(z, \beta_H))]^{0,5}. \quad (15)$$

Анализ полученных результатов

Расчеты величины $LDR(z)$ осуществлялись по формуле (1) с использованием значений амплитуд (14), (15).

На рис. 1 приведены результаты расчетов $LDR(z)$ для различных значений степени поляризационной анизотропии μ при интенсивности дождя $R = 12,5$ мм/ч.

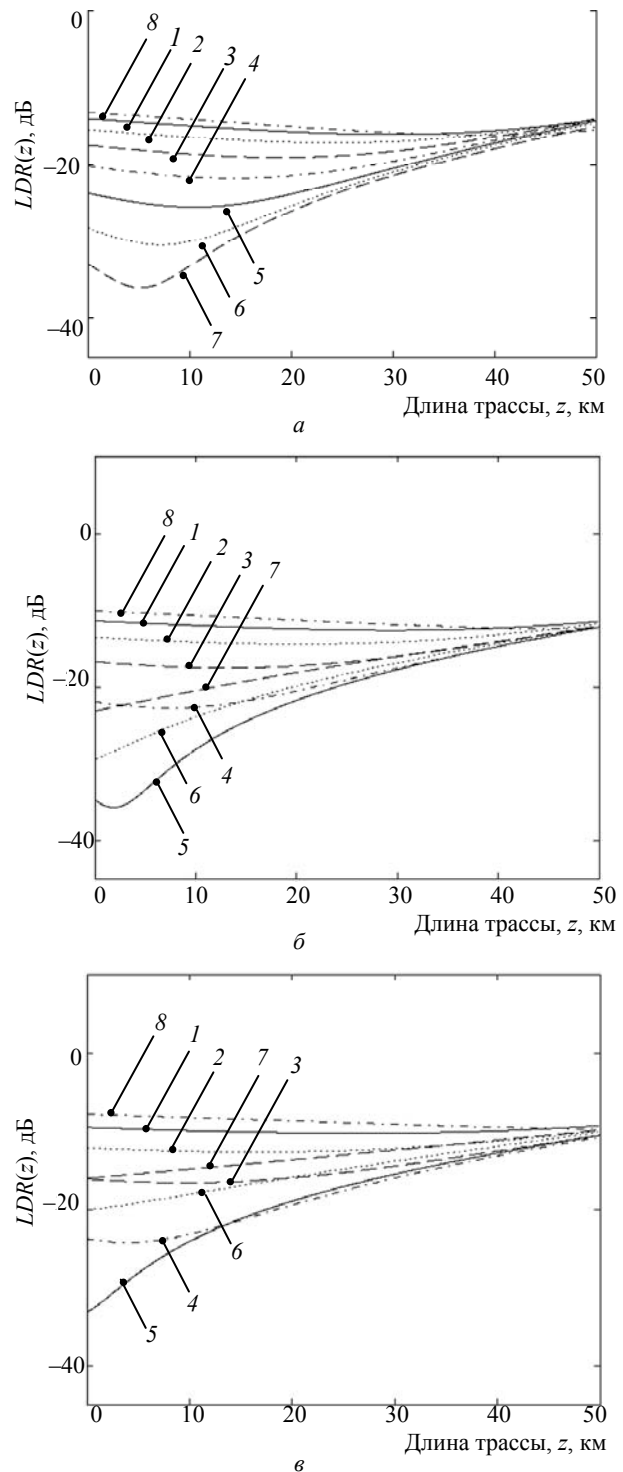


Рис. 1. Зависимость линейного деполаризационного отношения от длины трассы при интенсивности осадков 12,5 мм/ч, $\beta_H = 45^\circ$ и степени поляризационной анизотропии μ : а – 0,1; б – 0,2; в – 0,3

Расчеты приведены для следующих значений θ : $1 - \theta = 0^\circ$; $2 - \theta = 11,25^\circ$; $3 - \theta = 22,5^\circ$; $4 - \theta = 33,75^\circ$; $5 - \theta = 45^\circ$; $6 - \theta = 56,25^\circ$; $7 - \theta = 67,5^\circ$; $8 - \theta = 78,75^\circ$.

Расчеты приведены для значения $\beta_H = 45^\circ$. С одной стороны, при этом значении β_H происходят наиболее характерные изменения оценки $LDR(z)$, с другой стороны, согласно техническому описанию ДМРЛ-С [6], излучение сигнала с линейной поляризации с углом ориентации плоскости поляризации $\beta_H = 45^\circ$ является одним из наиболее характерных режимов работы радиолокатора.

Расчеты проводились для линейно поляризованных излучаемых волн трехсантиметрового диапазона, для которых величины R , $\Delta\alpha$, $\Delta\Phi$ составляют следующие значения [4, 14]:

$\Delta\alpha = 0,02$ дБ/км; $\Delta\Phi = 1$ град/км при $R = 12,5$ мм/ч;
 $\Delta\alpha = 0,1$ дБ/км; $\Delta\Phi = 4$ град/км при $R = 50$ мм/ч;
 $\Delta\alpha = 0,8$ дБ/км; $\Delta\Phi = 14$ град/км при $R = 150$ мм/ч.

При этом под дифференциальным фазовым сдвигом следует понимать фазовый сдвиг между ортогональными компонентами облучающей волны, возникающий при распространении радиолокационного сигнала в среде, заполненной гидрометеорами. Наличие этого фазового сдвига установлено экспериментально в работах [14, 15].

Предел изменения значений степени анизотропии μ при расчетах выбран с учетом их соответствия минимальным и максимальным размерам капель, дающим основной вклад в радиолокационную отражаемость и представляющими значимый интерес при решении задач метеорологической радиолокации [15, 16].

Как следует из расчетных зависимостей величины $LDR(z)$, для случая интенсивности осадков 12,5 мм/ч характер изменения линейного деполяризационного отношения подвержен изменению в зависимости от угла ориентации собственного поляризационного базиса анизотропного участка и степени поляризационной анизотропии этого участка.

На рис. 1, а величина $LDR(z)$ принимает значение при длине трассы распространения $z = 0$ от -14 до -33 дБ в зависимости от угла ориентации собственного базиса θ . При длине трассы $z = 50$ км значение $LDR(z)$ для различных θ находится в диапазоне от -15 до -17 дБ. Подобное изменение расчетного линейного деполяризационного отношения также характерно для случаев, показанных на рис. 1, б и в. При этом величина $LDR(z)$ принимает значение при $z = 0$ от -10 до -33 дБ для рис. 1, б и от -7 до -33 дБ для случая представленного на рис. 1, в, а при $z = 50$ км – от -12 до -14 и от -9 до -11 дБ соответственно.

Также, как видно из рис. 1, а, имеет место изменение характера $LDR(z)$ с убывающего на возрастающий. Наиболее выраженным случаем (см. рис. 1, а) является расчетная зависимость $LDR(z)$ при $\theta = 67,5^\circ$ при длине трассы распространения от 0 до 10 км, значение которой изменяется от -33 ($z = 0$ км) до -38 дБ ($z = 5$ км).

Расчеты также показывают, что при интенсивности осадков $R = 12,5$ мм/ч и значениях углов $\beta_H < 45^\circ$ наблюдается изменение характера зависи-

мости $LDR(z)$ по сравнению с зависимостями, представленными на рис. 1, а–в. При $\beta_H = 0^\circ$, $\mu = 0,1$ разброс значений $LDR(z)$ составляет порядка 10 дБ (между значениями $LDR(z)$ при $\theta = 0^\circ$ и значениями $LDR(z)$ при $\theta = 33,75^\circ$) на всем протяжении длины трассы распространения (при $z = 50$ км), при этом изменения $LDR(z)$ имеют возрастающий характер. Для значений углов $\beta_H > 45^\circ$ характер изменения $LDR(z)$ убывающий. В случае $\beta_H = 78,75^\circ$, $\mu = 0,1$ имеет место разброс значений $LDR(z)$ до 4 дБ (между значениями $LDR(z)$ при $\theta = 67,5^\circ$ и значениями $LDR(z)$ при $\theta = 78,75^\circ$).

На рис. 2 представлены расчетные зависимости $LDR(z)$ для случая интенсивности дождя 50 мм/ч и $\beta_H = 45^\circ$. Значения θ соответствуют значениям на рис. 1.

Изменение характера зависимости $LDR(z)$ происходит на интервале z от 0 до 4 км, при этом имеет место перепад, составляющий порядка 6 дБ (см. рис. 2, а для случая $\theta = 67,5^\circ$), тогда как в предыдущем случае интервал z соответствующий подобным характерным изменениям $LDR(z)$, составляет от 0 до 10 км.

В отличие от предыдущего случая ($R = 12,5$ мм/ч), при длине трассы z от 40 до 50 км появляется повторная смена характера изменения расчетной величины $LDR(z)$: возрастающий характер меняется на убывающий с наличием характерных пиков (до 18 дБ для случая $\theta = 78,75^\circ$, см. рис. 2, в) на графике $LDR(z)$. С увеличением μ эти пики становятся более выраженными.

На длине трассы распространения до 11 км весьма выражено влияние угла θ на расчетную величину: разброс значений $LDR(z)$ составляет порядка 20 дБ при изменении θ от $67,5$ до $78,75^\circ$ (см. рис. 2, а) и от 45 до $78,75^\circ$ (см. рис. 2, б и в).

Расчеты также показывают, что при интенсивности осадков $R = 50$ мм/ч и значениях углов $\beta_H < 45^\circ$ наблюдается уменьшение влияния значения θ при всех значениях степени поляризационной анизотропии μ . При $\mu = 0,3$ и $\beta_H = 0^\circ$ разброс значений $LDR(z)$ уменьшается до 10 дБ. Причем в области положительных значений $LDR(z)$ указанный разброс также уменьшается до 10 дБ. Для случая, когда значения углов $\beta_H > 45^\circ$, также наблюдается существенное уменьшение влияния θ на величину $LDR(z)$ при всех μ . При $\mu = 0,3$ и $\beta_H = 78,75^\circ$ разброс значений $LDR(z)$ уменьшается до 12 дБ, при этом $LDR(z)$ находится в области отрицательных значений для любых значений θ .

Выраженный характер изменений имеют расчетные зависимости величины $LDR(z)$ при интенсивности осадков 150 мм/ч и том же угле начальной ориентации измерительного базиса относительно базиса среды $\beta_H = 45^\circ$ (рис. 3). Значения θ соответствуют значениям на рис. 1.

Для всех расчетных зависимостей величины $LDR(z)$, представленных на рис. 3, имеют место участки z со сменой характера изменений с возрастающего на убывающий. Появляющиеся при таком характере изменений перепады достигают величины порядка 12 дБ (см. рис. 3, в для $\theta = 78,75^\circ$ в диапазоне z от 0 до 8 км), при этом сама величина $LDR(z)$ изменяется в пределах значений от -43 (см. рис. 3, б для $\theta = 45^\circ$) до 4 дБ (см. рис. 3, б для всех значений θ).

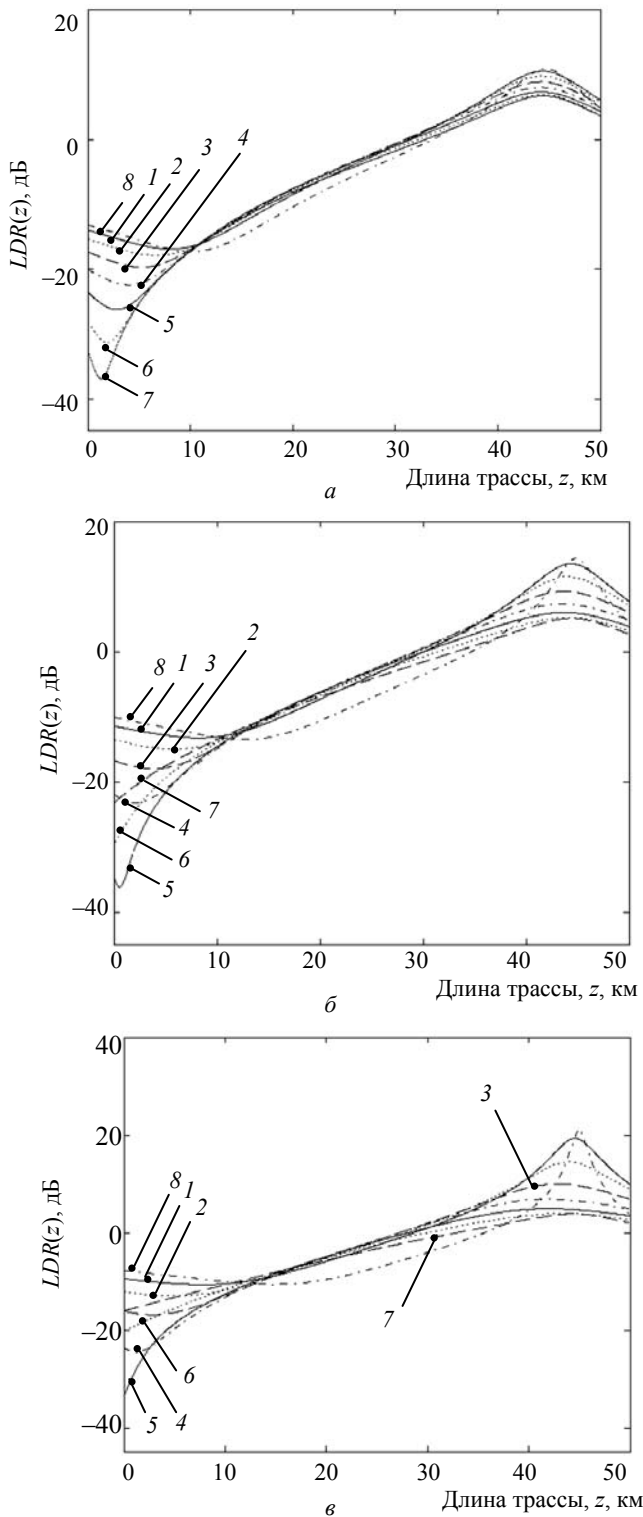


Рис. 2. Зависимость линейного деполаризационного отношения от длины трассы при интенсивности осадков 50 мм/ч, $\beta_H = 45^\circ$ и степени поляризационной анизотропии μ : а – 0,1; б – 0,2; в – 0,3

С увеличением степени поляризационной анизотропии влияние θ на величину $LDR(z)$ увеличивается.

Расчеты также показывают, что при интенсивности осадков равной 150 мм/ч, в случае когда углы $\beta_H < 45^\circ$, зависимость $LDR(z)$ будет аналогичной приведенной на рис. 3 а–в.

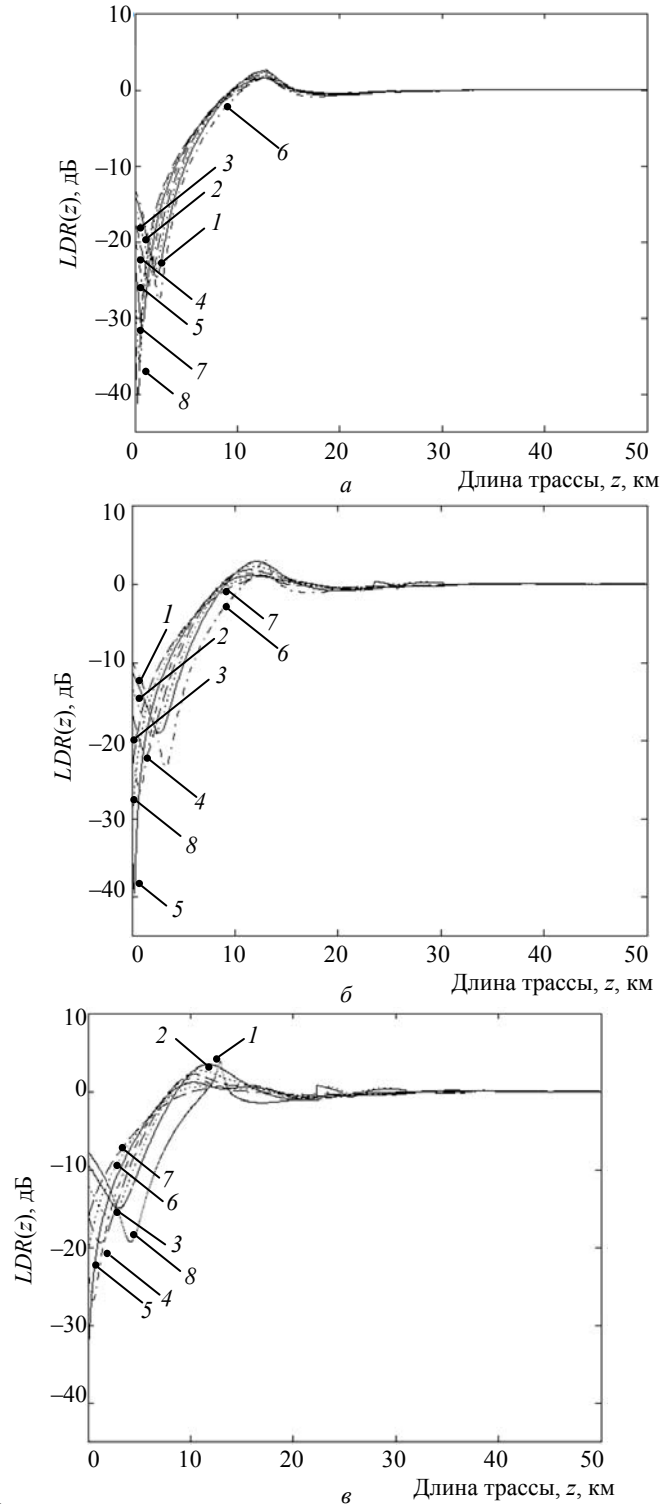


Рис. 3. Зависимость линейного деполаризационного отношения от длины трассы при интенсивности осадков 150 мм/ч, $\beta_H = 45^\circ$ и степени поляризационной анизотропии μ : а – 0,1; б – 0,2; в – 0,3

Однако минимальные значения величины линейного деполаризационного отношения увеличиваются до значений порядка -20 дБ ($\beta_H = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ и $\mu = 0,3$). В случае значений углов $\beta_H > 45^\circ$ для указанной интенсивности осадков также сохраняется характер зависимости $LDR(z)$, приведенной на рис. 3 а–в от -25 дБ при $\theta = 67,5^\circ$ до -5 дБ при $\theta = 0$ для случая $\beta_H = 78,75^\circ$, $\mu = 0,1$.

В указанных расчетных зависимостях угол θ с физической точки зрения соответствует изменению ориентации поляризационного базиса анизотропного участка, возникающему вследствие изменения геометрической ориентации капель дождя под воздействием ветрового сдвига и (или) статического электричества [5, 15]. В приведенных расчетах указанное влияние анизотропного участка проявляется в использовании матрицы рассеяния S , содержащей тригонометрические функции угла θ , вследствие чего зависимости $LDR(z)$ носят немонотонный характер.

Заключение

При дистанционном зондировании неоднородной вдоль трассы среды распространения, в отличие от однородной среды [8], появляется ряд характерных особенностей изменчивости линейного деполаризационного отношения, связанных как с воздействием дифференциальных факторов среды распространения, так и, в особенности, с изменением угла ориентации собственного поляризационного базиса анизотропного участка и изменением степени поляризационной анизотропии этого участка. Эти особенности проявляются в выраженном уменьшении величины линейного деполаризационного отношения на малых дальностях (до величин $LDR(z)$ порядка 40 дБ) с последующим резким возрастанием и изменением знака величины $LDR(z)$ при интенсивности осадков 50 и 150 мм/ч, причем в последнем случае изменение знака величины $LDR(z)$ наблюдается при гораздо меньшей длине трассы распространения порядка 12 км.

Перечисленные особенности изменчивости линейного деполаризационного отношения позволяют обеспечить дистанционное получение информации для принятия решения о наличии в зондируемой области метеобразований

1) процессов, связанных с поперечными сдвигами ветра;

2) зон повышенного статического электричества (зон грозовой активности).

Приведенные в данной статье результаты расчетов справедливы, как было указано выше, для радиолокационных сигналов трехсантиметрового диапазона.

Поскольку указанные выше явления представляют собой опасные факторы для различных областей хозяйственной деятельности, например полетов воздушных судов гражданской авиации, результаты, полученные в данной работе, имеют практическую значимость.

Литература

- Galletti M. Measurement and characterization of entropy and degree of polarization of weather radar targets / M. Galletti, D.H.O. Bebbington, M. Chandra, T. Boerner // IEEE T. Geosci. Remote. – 2008. – Vol. 46, No. 10. – P. 3196–3207.
- Galletti M. Fully polarimetric analysis of weather radar signatures / M. Galletti, D.H.O. Bebbington, M. Chandra, T. Boerner // IEEE Radar Conf. – 2008. – P. 561–566.
- Масалов Е.В. Точностные характеристики поляризационного радиолокатора при зондировании среды, заполненной гидрометеорами / Е.В. Масалов, С.В. Янов // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 17–19.

- Масалов Е.В. Трансформация линейно поляризованных электромагнитных волн в средах, содержащих гидрометеоры // Матер. междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С. 77–79.

- Масалов Е.В. Поляризационные измерения в задачах радиолокационной метеорологии / Е.В. Масалов, В.Н. Татаринов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 4. – С. 44–52.

- Вовшин Б.М. Теория и практика поляризационных измерений в метеорологической радиолокации [Электронный ресурс] / Б.М. Вовшин, И.С. Вылегжанин, В.Ю. Жуков и др. // Матер. V Всерос. конф. «Вторые Всерос. Армандовские чтения» (Муром). – 2012. – С. 49–54. – Режим доступа: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/P5.pdf>, свободный (дата обращения: 25.05.2018).

- Galletti M. Degree of polarization at simultaneous I transmit: Theory and applications for weather radar / M. Galletti, D.S. Zmic, V.M. Melnikov, R.J. Doviak // IEEE T. Geosci. Remote. – 2012. – Vol. 9, No. 3. – P. 383–387.

- Масалов Е.В. Анализ влияния гидрометеоров на величины дифференциальной радиолокационной отражаемости и линейного деполаризационного отношения радиолокационных сигналов / Е.В. Масалов, Н.Н. Кривин, К.В. Кокоулин // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 2(20). – С. 28–35.

- Eigenvalue Signal Processing for Weather Radar Polarimetry: Removing the Bias Induced by Antenna Coherent Cross-Channel Coupling / M. Galletti, D. S. Zmic, F. Gekat, P. Goetz // IEEE T. Geosci. Remote. – 2014. – Vol. 52, No. 12. – P. 7695–7707.

- Galletti M. Zenith/Nadir pointing mm-wave radars: linear or circular polarization? / M. Galletti, D. Huang, P. Kollias // IEEE T. Geosci. Remote. – 2014. – Vol. 52, No. 1. – P. 628–639.

- Montopoli M. Meteorological radar systems / M. Montopoli, F.S. Marzano // Integrated ground-based observing systems. – Berlin: Springer, Heidelberg, 2010. – P. 33–57.

- Татаринов В.Н. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Поляризация плоских электромагнитных волн и её преобразования: учеб. пособие / В.Н. Татаринов, Л.П. Лигтхарт, С.В. Татаринов. – Томск: ТУСУР, 2012. – Т. 1. – 380 с.

- Масалов Е.В. Представление матрицы рассеяния метеоцели / Е.В. Масалов, В.А. Потехин, В.Н. Татаринов // Изв. высш. учеб. завед. Физика. – Томск, 1983. – № 7. – С. 1–10.

- Родимов А.П. Особенности использования поляризационных параметров ЭМВ в системах связи миллиметрового диапазона / А.П. Родимов, В.В. Поповский, В.И. Дмитриев // ЗРЭ. – 1980. – № 7. – С. 25–37.

- Огути Т. Распространение и рассеяние электромагнитных волн в дожде и других гидрометеорах // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 9. – С. 6–65.

- Экспериментальные исследования анизотропии рассеяния радиолокационных сигналов облаками и осадками / Н.Н. Бадулин, А.П. Бацула, Е.Б. Кульшенева и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1984. – Т. 20, № 6. – С. 505–510.

Масалов Евгений Викторович

Д-р техн. наук, профессор каф. конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-846-42-13
Эл. почта: e-v-masalov@yandex.ru

Кривин Николай Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КИПР ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-882-91-87
Эл. почта: freeman46@yandex.ru

Кокоулин Константин Владимирович

Студент каф. КИПР ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-845-15-06
Эл. почта: jelikavar@gmail.com

Masalov E.V., Krivin N.N., Kokoulin K.V.

Analysis of the linear depolarization ratio variability in the radiolocation sensing of inhomogeneous medium filled with hydrometeors

The theoretical results for estimating the linear depolarization ratio are obtained by using the Jones vector in eigenbasis of the homogeneous propagation medium and the complex phasor of the radar signal scattered by the second medium region which follows directly after the first, homogeneous medium region. The second medium region is characterized by anisotropic polarization properties and orientation angle of its eigenbasis. Herewith changes in the polarization structure of the radar signal in the process of its propagation in this medium are analyzed. Such changes depend on initial orientation angle of the polarization basis of the radar relative to the eigenbasis of the homogeneous region, the degree of anisotropy of the second region and orientation angle of its eigenbasis. Linear depolarization ratio calculation results in the radar signal reception point for the different rain intensity are given. Obtained results are analyzed.

Keywords: polarization, ellipticity angle, polarization ellipse orientation angle, differential attenuation, differential phase shift, orientation angle of the anisotropic region's eigenbasis, polarization anisotropy degree, linear depolarization ratio, precipitation.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-7-13

References

1. Galletti M., Bebbington D.H.O., Chandra M., Boerner T. Measurement and characterization of entropy and degree of polarization of weather radar targets. *IEEE T. Geosci. Remote*, 2008, vol. 46, no. 10, pp. 3196–207.
2. Galletti M., Bebbington D.H.O., Chandra M., Boerner T. Fully polarimetric analysis of weather radar signatures. *IEEE Radar Conf.*, 2008, pp. 561–566.
3. Masalov E.V., Yanov S.V. Punctuality parameters of polarization radar at the hydrometeors remote sensing. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, vol. 24, no. 2, pp. 17–19.
4. Masalov E.V. Transformation of linearly polarized electromagnetic waves in media containing hydrometeors. *Proceedings of international conference «Actual problems of electronic instrument making»*, Novosibirsk, NGTU, 2010, pp. 77–79.
5. Masalov E.V., Tatarinov V.N. Polarization measurements in radar meteorology. *Russian physics journal*, 1987, no. 4, pp. 44–52.
6. Vovshin B.M., Vyligjanin I.S., Zhukov V.U., Pushkov A.A., Schukin G.G. Theory and practice of polarization measurements in meteorological radiolocation. *Proceedings of 5th Russian conference «Second Russian Armand Readings» (Murom)*, 2012, pp. 49–54 (In Russ.). Available at: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/P5.pdf> (accessed: 25 May 2018).

7. Galletti M., Zrnic D.S., Melnikov V.M., Doviak R.J. Degree of polarization at simultaneous transmit: Theory and applications for weather radar. *IEEE T. Geosci. Remote*, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 383–387.

8. Masalov E.V., Krivin N.N., Kokoulin K.V. An analysis of the influence of hydrometeors on the linear depolarization ratio and differential reflectivity of the radar signals. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 28–35.

9. Galletti M., Zrnic D. S., Gekat F., Goelz P. Eigenvalue Signal Processing for Weather Radar Polarimetry: Removing the Bias Induced by Antenna Coherent Cross-Channel Coupling. *IEEE T. Geosci. Remote*, 2014, vol. 52, no. 12, pp. 7695–7707.

10. Galletti M., Huang D., Kollias P. Zenith/Nadir pointing mm-wave radars: linear or circular polarization? *IEEE T. Geosci. Remote*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 628–639.

11. Montopoli M., Marzano F.S. *Meteorological radar systems. Integrated ground-based observing systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 33–57.

12. Tatarinov V.N., Lighthart L.P., Tatarinov S.V. *Vvedenie v sovremennuju teoriju polarizacii radiolokacionnyh signalov. Polarizacija ploskih elektromagnitnyh voln i eje preobrazovanie*. [An introduction to the modern polarization theory of radar signals. The polarization of a plane electromagnetic waves and its transformations]. Tomsk, TUSUR, 2012, vol. 1, 380 p. (In Russ.).

13. Masalov E.V., Potehin V.A., Tatarinov V.N. Representation of the meteorological objects scattering matrix. *Russian Physics Journal*, Tomsk, 1983, no. 7, pp. 1–10. (In Russ.)

14. Rodimov A.P., Popovsky V.V., Dmitriev V.I. Features of using the EMW polarization parameters in millimeter-wave communication systems, *Russian physics journal*, 1980, no. 7, pp. 25–37.

15. Oguti T. Rasprostranenie i rassejanie elektromagnitnyh voln v dojde i drugih gidrometeorah. [Electromagnetic waves propagation and scattering in rain and other hydrometeors], *IEEE*, 1983, vol. 71, no. 9, pp. 6–65 (In Russ.)

16. Badulin N.N., Bacula A.P., Kulsheneva E.B. Experimentalnie issledovaniya anizotropii rassejanija radiolokacionnyh signalov oblakami i osadkami [Experimental investigation of anisotropy of radar signal scattering by clouds and precipitation]. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 1984, vol. 20, no. 6, pp. 505–510.

Evgenii V. Masalov

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Radio Equipment Design and Production
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-846-42-13
Email: e-v-masalov@yandex.ru

Nikolai N. Krivin

PhD of Technical Sciences, Assistant Professor,
Department of Radio Equipment Design
and Production TUSUR
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-882-91-87
Email: freeman46@yandex.ru

Konstantin V. Kokoulin

Student, Department of Radio Equipment Design
and Production TUSUR
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-845-15-06
Email: jelikavar@gmail.com

УДК 621.372.8

А.Д. Безпалый, **В.М. Шандаров**, А.Е. Мандель

Канальные волноводные структуры, оптически индуцированные в кристалле ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем

Представлены результаты экспериментальных исследований формирования канальных оптических волноводных структур в образцах ниобата лития Y-среза с фоторефрактивным поверхностным слоем. Структуры получены путем поточечного индуцирования изменений показателя преломления лазерным излучением из зеленой области спектра.

Ключевые слова: оптическое индуцирование, поточечное экспонирование, ниобат лития, фоторефрактивный эффект, канальные волноводы.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-14-16

За последние годы преобразование световых полей и изучение способов управления светом привлекает наибольший интерес для интегральной оптики и волноводной фотоники [1, 2]. В связи с этим большинство задач требует решения по созданию и разработке элементов локализации лазерного излучения, что способствует развитию и совершенствованию оптических устройств и приборов [3–5]. В качестве таких элементов могут выступать волноводные структуры на основе фоторефрактивных материалов, одним из которых является ниобат лития [6–8]. Благодаря своим физическим и нелинейно-оптическим свойствам кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) широко используются на практике [2]. При помощи света можно воздействовать на изменение показателя преломления LiNbO_3 , что позволяет формировать канальные оптические волноводы, топология которых определяется способом оптического индуцирования и формой пути экспонирующего пучка [9, 10].

Оптическое индуцирование канальных волноводов и волноводных систем можно осуществлять различными способами: например, при помощи амплитудной маски, фокусировки лазерного излучения цилиндрической линзой или последовательным поточечным экспонированием, фокусируя световой пучок на поверхность кристалла сферической линзой [10–13].

Поточечное формирование позволяет контролировать локализацию экспонирующего излучения как по глубине кристалла, так и по его поперечным и продольным координатам, влияя тем самым на распределение суммарной интенсивности в фоторефрактивном материале. Так, при поточечном индуцировании канальных волноводов появляется возможность осуществлять периодическую модуляцию их параметров с различным шагом, что позволяет задавать продольную однородность структур, а также топологию и пространственные размеры таких структур в процессе формирования [13–15].

Целью данной работы является исследование возможностей формирования канальных волноводных структур различной топологии с пространственно-модулированными параметрами при их поточечном индуцировании в приповерхностном слое кристалла ниобата лития.

Оптическое индуцирование волноводных структур

Канальные волноводы индуцировались фокусированным лазерным пучком путем последовательного поточечного экспонирования поверхности кристаллического образца LiNbO_3 Y-среза с размерами $30 \times 3 \times 15$ мм³ по осям X , Y , Z соответственно. Поверхностный слой кристалла толщиной около 100 мкм легирован ионами меди. Источником излучения послужил YAG:Nd^{3+} лазер с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Свет распространялся вдоль оси Y кристалла. Поляризация экспонирующего излучения с мощностью 10 мВт соответствовала обыкновенной волне в кристалле. Расстояние между центрами экспонированных точек составляло в разных экспериментах от 25 до 50 мкм. Площадь экспонируемой области легированного слоя в различных экспериментах изменялась от ~200 до 3000 мкм².

Экспонированные области, образованные в виде параллельных полосок, сформированы из последовательно расположенных пятен с различным расстоянием между их центрами (рис. 1).

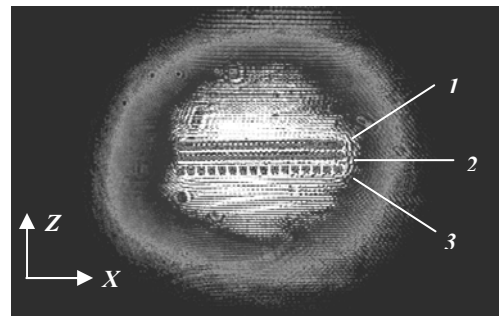


Рис. 1. Результат зондирования волноводной системы, сформированной поточечным экспонированием поверхности образца с расстоянием между центрами световых пятен 25 мкм (полоски 1 и 2) и 50 мкм (полоска 3)

Создавать прямолинейные структуры возможно и при оптическом индуцировании, фокусируя излучение цилиндрической линзой (рис. 2). Однако при использовании данного метода длина формируемых структур задается продольными размерами экспонирующего пучка. Такой способ недостаточно удобен, когда необходимо формировать структуры с меньшей длиной, так как для этого нужно ограничить апертуру формирующего пучка. В то же время пото-

чечный метод позволяет задавать необходимую длину индуцированной структуры в процессе формирования [13–15].

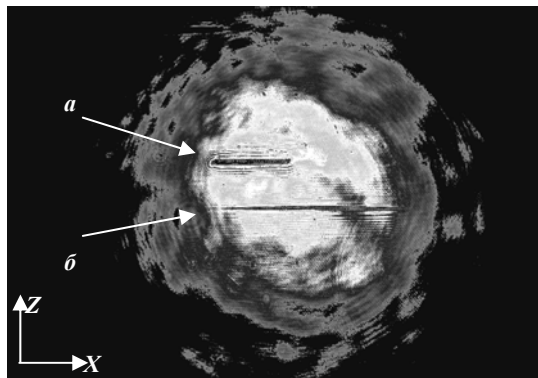


Рис. 2. Результат зондирования структур, сформированных перпендикулярно оптической оси кристалла поточечным методом (а) и с помощью цилиндрической линзы (б)

При индуцировании структур, ориентированных вдоль оптической оси, формирование фоторефрактивных фазовых элементов затруднено. Это связано с тем, что поле пространственного заряда появляется только на границах освещенной области, перпендикулярной направлению оптической оси кристалла. Однако поточечное экспонирование поверхности образца узким световым пучком позволяет индуцировать структуры вдоль оптической оси кристалла (рис. 3).

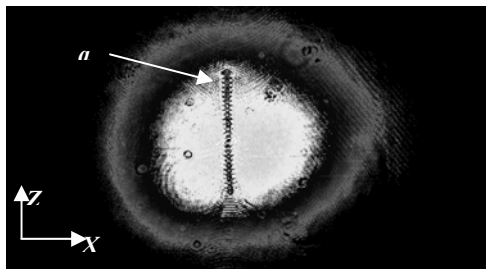


Рис. 3. Результат зондирования структуры, сформированной вдоль оптической оси кристалла поточечным методом

Поточечное индуцирование позволяет формировать прямолинейные структуры не только с периодически модулированными параметрами, но и изменять период модуляции показателя преломления в процессе формирования таких структур. Результат записи подобной структуры представлен на рис. 4.

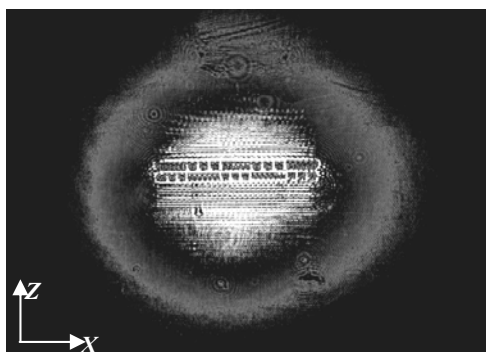


Рис. 4. Результат зондирования индуцированной волноводной структуры с изменением периода модуляции показателя преломления в процессе формирования

Полученные экспериментальные результаты показывают, что топология поточечно индуцированных канальных волноводных структур может не ограничиваться прямыми однородными линиями. Экспонирование поточечным методом позволяет создавать в фоторефрактивных слоях волноводные системы более сложной формы, определяемой траекторией смещения светового пятна по поверхности образца.

Заключение

Таким образом, в работе экспериментально продемонстрированы методы оптического индуцирования канальных волноводных структур с пространственной модуляцией их параметров в кристалле LiNbO_3 с фоторефрактивным поверхностным слоем. Полученные структуры можно многократно оптически реконфигурировать, что является важным при разработке и создании как отдельных элементов управления светом в оптических устройствах и приборах фотоники, так и для осуществления связи активных компонентов интегрально-оптических схем между собой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 3.1110.2017/ПЧ в рамках Госзадания вузу) и РФФИ (грант 16-29-14046-офи_м).

Литература

1. Kivshar Y.S. Optical solitons: from fibers to photonic crystals. – Academic Press, 2003. – 540 p.
2. Petrov M.P., Stepanov S.I., Khomenko A.V. Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems. – Springer Series in Optical Sciences, 2013. – 277 p.
3. Bazzan M. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications / M. Bazzan, C. Sada // Appl. Phys. Rev. – 2015. – Vol. 2, No. 4. – P. 040603-1–040603-25.
4. Kip D. Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications // Appl. Phys. B. – 1998. – Vol. 67. – P. 131–150.
5. Chen F. Development of ion implanted optical waveguides in optical materials: a review / F. Chen, X.L. Wang and K.M. Wang // Opt. Mater. – 2017. – Vol. 29. – P. 1523–1542.
6. Davydov S.A. Quasi-One-Dimensional Photonic Lattices and Superlattices in Lithium Niobate: Linear and Nonlinear Discrete Diffraction of Light / S.A. Davydov, P.A. Trenikhin, V.M. Shandarov, K.V. Shandarova, D. Kip, Ch. Rueter, F. Chen // Physics of Wave Phenomena. – 2010. – Vol. 18, No.1. – P. 1–6.
7. Chen F. Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 106, № 8. – P. 081101.
8. Das B.K. Distributed Feedback-Distributed Bragg Reflector Couple Cavity Laser With a $\text{Ti}(\text{Fe})\text{:Er}:\text{LiNbO}_3$ Waveguide // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29. – P. 165–167.
9. Vittadello L. Photorefractive direct laser writing / L. Vittadello, A. Zaltron, N. Argiolas, M. Bazzan, N. Rossetto, R. Signorini // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2016. – Vol. 49, No. 12. – P. 1–9.
10. Kroesen S. Electro-optical tunable waveguide embedded multiscan Bragg gratings in lithium niobate by direct femtosecond laser writing / S. Kroesen, W. Horn, J. Imbrock, C. Denz // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, No. 19. – P. 23339–23348.
11. Kanshu A. Optically-induced defect states in photonic lattices: formation of defect channels, directional couplers, and disordered lattices leading to Anderson-like light localization / A. Kanshu, C.E. Rüter, D. Kip, V.M. Shandarov // J. Appl. Phys. – 2009. – B. 95. – P. 537–543.

12. Courjal N. Low-loss LiNbO₃ tapered-ridge waveguides made by optical-grade dicing / N. Courjal, F. Devaux, A. Gerthoffer et al. // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23. – P. 13983–13990.

13. Безпальный А.Д. Волноводные и дифракционные элементы устройств и приборов фотоники, оптически индуцированные в подложках ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем / А.Д. Безпальный, А.О. Верхотуров, В.М. Шандаров // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 4 (38). – С. 86–90.

14. Bezpaly A.D. Channel waveguides and phase diffraction gratings optically formed in photorefractive surface layers of lithium niobate / A.D. Bezpaly, A.O. Verkhoturov, V.M. Shandarov // *Proceedings of SPIE*. – 2017. – Vol. 10603. – P. 106030O-1–106030O-6.

15. Bezpaly A.D. Optical writing of channel waveguides and 1D diffraction gratings in photorefractive surface layers of lithium niobate / A.D. Bezpaly, A.O. Verkhoturov, V.M. Shandarov // *Ferroelectrics*. – 2017. – Vol. 515:1. – P. 34–43.

5. Chen F., Wang X.L. and Wang K.M. Development of ion implanted optical waveguides in optical materials: a review. *Opt. Mater.*, 2017, vol. 29, pp. 1523–1542.

6. Davydov S.A. Quasi-One-Dimensional Photonic Lattices and Superlattices in Lithium Niobate: Linear and Nonlinear Discrete Diffraction of Light. *Physics of Wave Phenomena*, 2010, vol. 18, no. 1, pp. 1–6.

7. Chen F. Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, no. 8, p. 081101.

8. Das B.K. Distributed Feedback-Distributed Bragg Reflector Couple Cavity Laser With a Ti:(Fe):Er:LiNbO₃ Waveguide. *Optics Letters*, 2004, vol. 29, pp. 165–167.

9. Vittadello L., Zaltron A., Argiolas N., Bazzan M., Rossetto N., Signorini R. Photorefractive direct laser writing. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2016, vol. 49, no. 12, pp. 1–9.

10. Kroesen S., Horn W., Imbrock J., Denz C. Electro-optical tunable waveguide embedded multiscan Bragg gratings in lithium niobate by direct femtosecond laser writing. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 19, pp. 23339–23348.

11. Kanshu A., Rüter C. E., Kip D. and Shandarov V. M. Optically-induced defect states in photonic lattices: formation of defect channels, directional couplers, and disordered lattices leading to Anderson-like light localization. *J. Appl. Phys.*, 2009, b. 95, pp. 537–543.

12. Courjal N., Devaux F., Gerthoffer A. et al. Low-loss LiNbO₃ tapered-ridge waveguides made by optical-grade dicing. *Optics Express*, 2015, vol. 23, pp. 13983–13990.

13. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Waveguide and diffraction elements of photonic devices and structures optically induced in lithium niobate wafers with photorefractive surface layer. *Doklady TUSUR*, 2015, №4 (38), pp. 86–90.

14. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Channel waveguides and phase diffraction gratings optically formed in photorefractive surface layers of lithium niobate. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10603, pp. 106030O-1–106030O-6.

15. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Optical writing of channel waveguides and 1D diffraction gratings in photorefractive surface layers of lithium niobate. *Ferroelectrics*, 2017, vol. 515:1, pp. 34–43.

Безпальный Александр Дмитриевич

Аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР), мл. науч. сотр. научно-образовательного центра «Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии» Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-18
Эл. почта: id_alex@list.ru

Шандаров Владимир Михайлович

Д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр. научно-образовательного центра «Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии» ТУСУР

Мандель Аркадий Евсеевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) ТУСУР Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-18
Эл. почта: mandelae@svch.tusur.ru

Bezpaly A.D., [Shandarov V.M.], Mandel A.E.

Channel waveguide structures optically induced in a lithium niobate crystal with a photorefractive surface layer

Experimental results of studies of channel waveguide structures formation in Y-cut lithium niobate samples with photorefractive surface layers are demonstrated. The structures are obtained by point-by-point inducing of refractive index changes by laser radiation from blue-green range.

Keywords: optical inducing, point-by-point exposure, lithium niobate, photorefractive effect, channel waveguides.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-14-16

References

1. Kivshar Y.S. *Optical solitons: from fibers to photonic crystals*. Academic Press, 2003. 540 p.

2. Petrov M.P., Stepanov S.I., Khomenko A.V. *Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems*. Springer Series in Optical Sciences, 2013. 277 p.

3. Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications. *Appl. Phys. Rev.*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 040603-1–040603-25.

4. Kip D. Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications. *Appl. Phys. B.*, 1998, vol. 67, pp. 131–150.

Alexander D. Bezpaly

PhD student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Junior Researcher, Science Educational Center «Nonlinear Optics, Nanophotonics and Laser Technologies», Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-18
Email: id_alex@list.ru

Vladimir M. Shandarov

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Science Educational Center «Nonlinear Optics, Nanophotonics and Laser Technologies», TUSUR

Arkady E. Mandel

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-18
Email: mandelae@svch.tusur.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

УДК 004.057.4:004.738

Е.В. Щерба, В.И. Никонов, Г.А. Литвинов

Обеспечение безопасности протоколов маршрутизации для телекоммуникационных сетей с динамической топологией

Дан сравнительный обзор актуальных угроз безопасности и применяемых подходов к защите протоколов маршрутизации для телекоммуникационных сетей с динамической топологией, включая сети MANET, WSN и др. Рассматриваются более 20 значимых и перспективных протоколов маршрутизации, безопасность в рамках которых обеспечивается посредством двух базовых подходов – криптографической защиты и защиты на основе концепции доверия и кооперации узлов. Выделены достоинства, недостатки и уязвимости рассмотренных протоколов, а также определены перспективные направления для дальнейших исследований.

Ключевые слова: беспроводные самоорганизующиеся сети, MANET, VANET, FANET, WSN, уязвимости маршрутизации, сетевая безопасность.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-19-29

Увеличение количества мобильных сетевых устройств по всему миру спровоцировало интенсивные исследования по различным аспектам взаимодействия данных устройств. Среди большого количества зарубежных и отечественных работ в данной области можно выделить несколько основных направлений исследований, которые охватывают технологии самоорганизующихся сетей мобильных устройств (MANET), беспроводных сенсорных сетей (WSN), самоорганизующихся сетей беспилотных летательных аппаратов (FANET), самоорганизующихся сетей интеллектуальной транспортной системы (VANET) и др. Таким образом, широкий спектр оборудования гражданского и военного назначения может объединяться в сети посредством сетевой архитектуры беспроводных динамически организуемых децентрализованных сетей [1, 2].

Ключевые особенности рассматриваемой архитектуры по сравнению с традиционной фиксированной архитектурой телекоммуникационных сетей состоят в следующем. Во-первых, каждое устройство может выступать в качестве маршрутизатора, т.е. принимать сетевые пакеты, адресованные другим узлам, производить выбор направления для дальнейшей передачи пакетов и осуществлять эту передачу. Во-вторых, подвижность узлов влечет за собой постоянные изменения в сетевой топологии, т.е. топология сети является динамической. Данные особенности обуславливают разработку специализированных протоколов маршрутизации для данных сетей. Кроме того, указанные особенности являются источником уязвимостей безопасности самого процесса маршрутизации сетевых пакетов в данных сетях, что порождает целый класс атак на протоколы маршрутизации, специфичный для рассматриваемой архитектуры.

Таким образом, основная цель данной работы заключается в аналитическом исследовании разработанных протоколов маршрутизации, уязвимостей их безопасности и предусмотренных методов и механизмов защиты.

Протоколы маршрутизации для сетей с динамической топологией

Благодаря широкому спектру приложений указанной архитектуры в сетях различного назначения

к настоящему моменту разработано несколько десятков протоколов маршрутизации для данных сетей, которые можно условно классифицировать на несколько групп: проактивные, реактивные, гибридные.

Проактивные (табличные) протоколы маршрутизации основаны на постоянном обмене служебными пакетами для регулярной актуализации таблицы маршрутов и обладают чертами традиционной табличной маршрутизации. Такой принцип эффективен в сравнительно небольших сетях, но может оказаться слишком затратным при значительном увеличении числа подключенных к сети устройств. Для эффективной работы проактивных протоколов в больших сетях требуется отсутствие существенных ограничений по пропускной способности и вычислительным ресурсам для обработки огромных таблиц маршрутизации. Рядовые сценарии, такие как добавление нового узла, изменение его расположения или удаление, могут вызывать задержки в сетях с проактивной маршрутизацией.

Протокол DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) [3] стал одним из первых проактивных протоколов маршрутизации, предложенных для динамически организуемых сетей. Данный табличный протокол основан на алгоритме Беллмана–Форда и для каждой записи маршрутизации помимо метрики маршрута предусматривает наличие возрастающего порядкового номера, что позволяет избегать маршрутизации пакетов по замкнутому кругу.

Наиболее распространенным и перспективным проактивным протоколом маршрутизации в сетях с динамической топологией является протокол OLSR (Optimized Link State Routing) [4]. Учитывая специфику OLSRv2 [5], выпущенные Инженерным советом Интернета (IETF) в 2014 г., протокол является первым обновленным протоколом среди всех стандартизированных протоколов маршрутизации, применяемых в динамически организуемых сетях. Каждый узел в рамках указанного протокола регулярно производит обнаружение соседних узлов, доступных за один и за два перехода, на основе широковещательных сообщений приветствия (HELLO). Среди всех узлов, доступных за один переход, осу-

существляется оптимальный выбор подмножества шлюзов MPR (Multipoint Relay), обеспечивающих связь со всеми узлами, доступными за два перехода. Каждый узел, выбранный в качестве шлюза MPR, производит рассылку широковещательных сообщений TC (Topology Control), которые в обязательном порядке содержат объявления маршрутов к узлам-селекторам, выбравшим данный узел в качестве шлюза MPR. Данные сообщения принимаются и обрабатываются всеми соседними узлами, но ретранслируются далее по сети только узлами, выбранными в качестве шлюзов MPR. На основе полученных сообщений TC каждый узел производит построение сетевой топологии и определяет оптимальные маршруты до всех получателей в соответствии с числом переходов для OLSRv1 либо в соответствии с установленной метрикой для OLSRv2. В результате в пересылке пакетов данных могут участвовать только узлы, выбранные в качестве шлюза MPR каким-либо другим узлом.

В рамках реактивных протоколов узел инициирует поиск маршрута только при возникновении необходимости передачи им информации (т.е. по требованию или по запросу). В больших сетях такой алгоритм позволяет сократить как размеры таблиц маршрутизации, так и объем рассылаемой информации. При этом очевидными проблемами реактивных протоколов являются высокие задержки при прокладке маршрута и отсутствие поддержки устаревающих маршрутов.

Обнаружение маршрутов в рамках реактивного протокола пошаговой маршрутизации AODV (Ad Hoc On-demand Distance Vector) [6] осуществляется посредством рекурсивной широковещательной рассылки управляющего пакета RREQ (Route Request). Если требуемый маршрут найден в таблице маршрутизации промежуточного узла либо пакет RREQ достигает узла назначения, ответный управляющий пакет RREP (Route Reply) высылается соответствующим узлом источнику в целях прокладки маршрута. Для поддержания связности с соседними узлами каждый узел регулярно производит отправку сообщений HELLO. Уведомление об ошибке маршрутизации осуществляется при помощи отправки управляющего пакета RRER (Route Error). Протоколом предусмотрена процедура обслуживания маршрутов (для удаления устаревших и потерявших актуальность маршрутов), которая также подразумевает рассылку управляющего пакета RERR.

Основное отличие реактивного протокола маршрутизации DSR (Dynamic Source Routing) [7] от протокола AODV заключается в применении концепции построения пути от источника передачи вместо пошаговой маршрутизации. Данный подход позволяет отказаться от периодической рассылки сообщений для проверки маршрутов, что в свою очередь ведет к снижению нагрузки на сеть и экономии ресурсов узлов. С другой стороны, эффективность протокола быстро ухудшается с увеличивающейся подвижностью узлов.

Сочетание проактивной и реактивной маршрутизации положено в основу так называемых гибридных протоколов. Один из способов такого комбинирования подходов, предлагаемый в рамках протокола ZRP (Zone Routing Protocol) [8], подразумевает зонирование сети. При этом внутри зон функционирует проактивная маршрутизация IARP (Intra-zone Routing Protocol), а взаимодействие между зонами организовано на основе реактивной маршрутизации IERP (Inter-zone Routing Protocol).

Анализ существующих уязвимостей протоколов маршрутизации

Изначально протоколы маршрутизации, разрабатываемые для динамически организуемых телекоммуникационных сетей, не обладали какими-либо защитными механизмами, учитывающими специфику данных сетей. Указанное обстоятельство способствовало возникновению множества пассивных и активных атак на эти протоколы. Наибольшее распространение получили традиционные атаки типа «человек посередине» и «отказ в обслуживании», а также класс атак, позволяющих перенаправлять сетевые пакеты по ложному маршруту [9, 10]. Далее перечислены основные виды сетевых атак на протоколы маршрутизации для телекоммуникационных сетей с динамической топологией.

Классическим примером атаки типа «отказ в обслуживании» является переполнение таблиц маршрутизации (Routing Table Overflow) соседних узлов путём объявления множества маршрутов к несуществующим узлам. В случае переполнения таблицы маршрутизации добавление в нее легитимных маршрутов станет невозможным.

Атаку типа «блэкхол» (Black Hole Attack) также можно отнести к атакам типа «отказ в обслуживании». В примере (рис. 1), иллюстрирующем атаку, сетевые пакеты, проходящие от отправителя V_1 через узел нарушителя M , отбрасываются и не передаются далее к получателю V_4 .

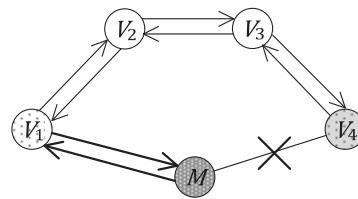


Рис. 1. Схема атак типа «блэкхол» и «грейхол»

Существует множество разновидностей указанной атаки, включая выборочное блокирование управляющих пакетов протокола маршрутизации, выборочное блокирование отдельных пакетов данных (атака типа «грейхол») и полное блокирование всех пакетов.

В ходе атаки типа «синкхол» (Sink Hole Attack) нарушитель M распространяет ложный оптимальный маршрут до узла получателя V_4 и тем самым направляет через себя сетевые пакеты, отправленные соседними узлами V_1 и V_2 (рис. 2).

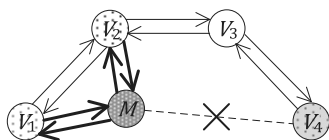


Рис. 2. Схема атаки типа «синкхол»

В результате кооперации нарушителей осуществляется атака типа «вормхол» (Worm Hole Attack), суть которой заключается в несанкционированном доступе к пакетам соседних устройств, передаваемых до получателя по реально существующему высококачественному каналу, созданному нарушителями. В примере (рис. 3), иллюстрирующем атаку, высокие характеристики создаваемого канала позволяют нарушителям M_1 и M_2 предложить оптимальный маршрут от узла V_1 к узлу V_5 и в обратном направлении. В результате сетевые пакеты, доставляемые ранее через узлы V_2 , V_3 и V_4 , будут перенаправлены через узлы нарушителей.

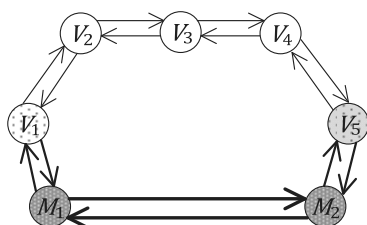


Рис. 3. Схема атаки типа «вормхол»

Помимо вышеназванных атак, отдельно можно отметить актуальность проблемы эгоистичности узлов (Selfish Attack), скрывающих маршруты в целях экономии ресурсов, и атаки сговора на механизм репутации, используемый в ряде протоколов маршрутизации для обеспечения их защиты (разновидность Sybil Attack). Реализация указанной атаки позволяет зависеть либо занизить значение репутации узла, что также может привести к изменению маршрута доставки пакета.

Подробный анализ известных уязвимостей для протокола OLSRv2, многие из которых актуальны и для других протоколов маршрутизации, был выпущен в 2017 г. Инженерным советом Интернета (IETF) в документе RFC 8116 [11].

Криптографические расширения безопасности протоколов маршрутизации

В ходе исследований по вопросам обеспечения безопасности протоколов маршрутизации было предложено множество решений, что привело к разработке ряда новых защищенных протоколов. Следует отметить, что большинство разработанных протоколов опираются на механизмы криптографических преобразований и были представлены как защищенные версии (расширения) существующих протоколов.

Учитывая доминирующий статус реактивных протоколов маршрутизации, основное внимание исследователей и разработчиков уделяется обеспечению безопасности данных протоколов. Так, протокол SAODV (Secure AODV) был предложен для

защиты управляющих пакетов протокола AODV на основе асимметричной криптосистемы [12]. Аутентификация пакетов RREQ и RREP производится посредством электронных подписей. Каждый управляющий пакет подписывается секретным ключом отправителя этого пакета. Промежуточные узлы и конечные получатели пакетов производят проверку подписи и осуществляют обработку и передачу пакетов только в случае её валидности.

Поскольку пакеты RREQ и RREP содержат изменяемое в процессе передачи поле Hop_Count (число переходов), аутентификация этого поля производится отдельно на основе цепочки хэшей. Узел-источник выбирает случайное значение (seed) в начале процесса обнаружения маршрута и устанавливает максимальное количество переходов (МНС). Далее источник вычисляет значение Hash как хэш исходного числа $h(\text{seed})$ и значение Top_Hash, как $h^{\text{МНС}}(\text{seed})$. Промежуточные узлы при получении управляющего пакета производят проверку корректности значения Top_Hash, учитывая текущее значение поля Hop_Count, после чего увеличивают значение поля Hop_Count и вычисляют новое значение Hash как $h(\text{Hash})$ перед дальнейшей рассылкой управляющего пакета RREQ. Одна из главных проблем протокола SAODV связана со сложностью безопасного распределения ключей (протокол подвержен атакам типа «человек посередине»).

Для решения данной проблемы реактивный протокол маршрутизации ARAN (Authenticated routing for ad hoc networks) [13] предусматривает наличие в самоорганизующейся сети удостоверяющего центра и применение криптографических сертификатов, что позволяет обеспечить аутентификацию сторон, целостность данных и неотказуемость. В ходе первой предварительной стадии протокола каждый подключаемый к сети узел должен инициировать создание сертификата открытого ключа, подписанного удостоверяющим центром. Далее в ходе реактивного обнаружения маршрутов для всех передаваемых сообщений на основе сгенерированных сертификатов выполняется обязательная аутентификация источника и получателя, что позволяет построить безопасный маршрут.

Кроме того, для повышения безопасности в рамках протокола также предусмотрены проверка подписи отправителя сообщения и формирование новой подписи каждым промежуточным передающим узлом. Вместе с тем ввиду сложности и ресурсоёмкости процедуры аутентификации протокол ARAN не получил широкого распространения. Среди других недостатков протокола можно выделить проблему выбора удостоверяющего центра и уязвимость к атакам типа «вормхол».

Схема защиты проактивного протокола OLSR, предложенная в работе [14], также предусматривает применение инфраструктуры открытых ключей в целях формирования и проверки подписи каждого управляющего сообщения протокола. Формируемая подпись включает временную метку и используется

для предотвращения модификации или фальсификации данных о топологии сети в передаваемых сообщениях. Однако, как было отмечено ранее, необходимость развертывания инфраструктуры открытых ключей является ограничивающим фактором в сетях с динамической топологией.

Альтернативный подход к защите OLSRv1 на основе асимметричной криптографии предложен разработчиками протокола SLSP (Secure Link State Routing Protocol) [15]. Протокол не предусматривает создание выделенного центра распределения ключей, вместо этого каждый узел самостоятельно генерирует ключевую пару и передает свой открытый ключ всем соседним узлам. Распространяемые сообщения приветствия и обновления маршрутизации подписываются секретным ключом отправителя. Защита изменяемого поля «Hop Count» производится на основе рассмотренного ранее механизма цепочки хэшей; кроме того, каждое обновление содержит поле «Sequence Number» (порядковый номер) для защиты от атаки воспроизведением.

Таким образом, протокол обеспечивает защищенное обнаружение соседних узлов и распространение маршрутной информации по сети. Кроме того, протокол SLSP устойчив к атакам, выполняемым в целях переполнения таблицы маршрутизации. Каждому из соседних узлов присваивается значение приоритета. Узлы, генерирующие максимальное число обновлений маршрутизации, имеют минимальный приоритет, что позволяет снизить эффективность атаки на отказ в обслуживании. Несмотря на то, что данный протокол не подвержен внешним атакам типа «блэкхол» и «синкхол», он не позволяет противостоять различным атакам сговора нескольких нарушителей.

Протокол SRP (Secure Routing Protocol) [16], предназначенный для защиты DSR и реактивной составляющей IERP гибридного протокола ZRP, предусматривает наличие общего ключа, используемого узлом источника и узлом назначения при организации защищенной связи SA (Security Association). Узел источника производит обнаружение маршрута до узла назначения посредством широковещательной рассылки управляющего пакета запроса маршрута RREQ, включающего пару идентификаторов (порядковый номер запроса и произвольный идентификатор запроса) и код аутентичности – значение ключевой хэш-функции, рассчитываемое на основе параметров запроса (адрес узла-источника, адрес узла назначения, идентификаторы). Промежуточные узлы, участвующие в пересылке пакета RREQ, добавляют в пакет свои адреса, а узел назначения осуществляет аутентификацию запроса посредством проверки кода аутентичности и формирует ответный пакет RREP, включающий использованные идентификаторы и новый код аутентичности. Доставка пакета RREP производится полностью в соответствии с маршрутом доставки пакета RREQ, а узел источника осуществляет его аутентификацию при получении.

Применение концепции маршрутизации от источника позволяет исключить необходимость осуществления криптографических преобразований промежуточными узлами, обеспечивающими пересылку пакетов между сторонами защищенной связи, что особенно актуально в рамках рассматриваемой архитектуры в целях повышения производительности и экономии ресурсов. Несмотря на все преимущества SRP, в рамках протокола не рассматривается проблема безопасного распределения ключей в динамически организуемой сети. Кроме того, протокол SRP, как и многие другие, также подвержен атакам типа «вормхол».

Протокол SEAD (Secure Efficient Ad hoc Distance-Vector), предложенный в работе [17], базируется на принципах работы проактивного дистанционно-векторного протокола DSDV. Особенностью протокола можно считать нестандартный механизм аутентификации записей обновлений маршрутизации, основанный на цепочке хэшей и дереве Меркла [18]. В соответствии со спецификациями протокола DSDV каждая запись маршрутизации помимо метрики маршрута включает порядковый номер. Произвольный узел при получении обновления маршрута заменяет запись в таблице маршрутизации, только если порядковый номер обновления выше текущего либо значение метрики обновления меньше текущего значения при условии совпадения порядковых номеров. Каждое обновление также включает идентификатор источника маршрута и значение $h_{n-i*m+j}$ из цепочки хэшей, где m – диаметр сети, i – порядковый номер записи маршрута, а j – значение метрики маршрута.

Таким образом, перехваченные значения цепочки хэшей не позволяют нарушительно сгенерировать обновление с более высоким порядковым номером либо с меньшей метрикой (при условии совпадения порядковых номеров). Вместе с тем данный подход не обеспечивает защиты от модификации других важных полей протокола, а процедура генерации дерева Меркла, привязанного к идентификаторам узлов сети, ограничивает применение протокола в сетях с динамической топологией.

Протокол SDSDV (Secure DSDV) [19] рассматривает подход, заложенный в протоколе SEAD. В отличие от SEAD протокол SDSDV не предусматривает построение дерева Меркла, в то время как каждый узел генерирует 2^n цепочек хэшей, где n – количество узлов сети. Аутентификация обновлений маршрутизации производится на основе дополнительных полей AL (Alteration Field) и AC (Accumulation Field), которые используются для защиты от понижения значения метрики и повышения номера последовательности соответственно. Следует отметить, что протоколы SEAD и SDSDV обладают типичными недостатками и подвержены всем уязвимостям, характерным для протоколов данного класса.

Разработчиками реактивного протокола SAR (Security-Aware Ad-hoc Routing) [20] был предложен перспективный подход, позволяющий обеспечить

высокую степень безопасности маршрутизации. Ключевой особенностью протокола является присваивание каждому узлу некоторого уровня безопасности. Прохождение пакетов через узлы с уровнем безопасности ниже требуемого не является безопасным. При этом главной метрикой маршрута становится уровень его безопасности, а его значение определяется как наименьшее среди уровней безопасности всех узлов, входящих в маршрут до узла назначения. Обнаружение маршрутов в рамках протокола производится по запросу узла отправителя, поскольку изначально SAR был предложен как расширение безопасности протокола маршрутизации AODV. В служебный пакет запроса маршрута RREQ помещается требуемое отправителем значение метрики безопасности маршрута. В результате узлы, получившие RREQ, но не обладающие необходимым уровнем безопасности, не имеют возможности объявлять маршрут и не участвуют в дальнейшей трансляции управляющего пакета. Узел, обладающий маршрутом до узла назначения с требуемым значением метрики безопасности, отправляет узлу источника расширенный в соответствии с протоколом SAR служебный пакет RREP.

Дополнительно протокол предусматривает криптографическую защиту всех передаваемых пакетов (аутентификация и шифрование). В ситуации, когда найдено несколько маршрутов, отвечающих требованиям безопасности, передача пакетов осуществляется по маршруту с минимальным значением метрики расстояния. С другой стороны, даже для полносвязной телекоммуникационной сети вероятны случаи, когда безопасный в понимании протокола маршрут не может быть предложен.

Гибкость протокола SAR может быть расширена в рамках ролевого подхода [21], что позволяет учитывать тип информационного потока при определении безопасного маршрута. Одна из основных проблем протокола заключается в отсутствии регламентированного механизма установления уровней безопасности взаимодействующих узлов, что затрудняет его практическое применение.

Эффективный подход для противодействия атакам «блекхол», «синкхол» и «вормхол» был предложен в рамках протокола SPREAD [22]. Идея протокола заключается в применении пороговой (k, n) схемы разделения секрета [23] к передаваемым сообщениям и последующей доставке всех частей секрета до получателя по различным маршрутам на базе многопутевой маршрутизации. Поскольку для восстановления секрета потребуется k частей, реализация атак типа «блекхол» или «синкхол» может быть успешной только при кооперации $(n - k)$ нарушителей. Вместе с тем избыточность, образуемая при применении указанной схемы, может быть существенным ограничением во многих динамически организуемых сетях.

В целом можно отметить, что криптографические преобразования позволяют обеспечить полную аутентификацию взаимодействующих сторон и

шифрование данных, передаваемых в том числе в рамках протоколов маршрутизации. Но в условиях ограниченности ресурсов в беспроводных самоорганизующихся сетях данные механизмы (особенно криптосистемы с открытым ключом) являются чересчур затратными, что вынуждает искать вспомогательные решения.

Кроме того, рассмотренные подходы не позволяют решить проблему эгоистичности узлов, а правильность информации, предоставляемой аутентифицированными узлами, не может быть гарантирована в рамках схем защиты, основанных исключительно на криптографических преобразованиях. Таким образом, все протоколы маршрутизации, безопасность которых обеспечивается по данным схемам (с определенными оговорками, за исключением протоколов SAR и SPREAD), уязвимы к атакам внутренних нарушителей и зараженных узлов, поскольку предполагается, что любой аутентифицированный узел является доверенным узлом без какой-либо дополнительной проверки.

Расширения безопасности протоколов маршрутизации на основе концепции доверия

Существует тесная взаимосвязь между понятиями «доверие» и «безопасность». Опираясь на концепцию доверия, можно существенно повысить уровень сетевой безопасности. Репутация является основной характеристикой узлов сети в рамках протоколов маршрутизации, базирующихся на установлении доверительных отношений между узлами и их кооперации. В результате кооперации в отношении узлов с плохой репутацией могут быть приняты специальные меры, включая их изоляцию.

Основные принципы концепции доверия в сетях MANET были сформированы в работе [24].

1. Метод определения доверия к взаимодействующему узлу должен быть полностью распределенным ввиду отсутствия третьей доверенной стороны (по типу удостоверяющего центра).

2. Определение доверия должно производиться гибким настраиваемым способом без излишней вычислительной и коммуникационной нагрузки, с учётом всей сложности и полноты доверительных отношений.

3. Определение доверия в MANET не должно строиться на готовности к сотрудничеству всех узлов. В условиях ограниченных ресурсов эгоизм сторон может преобладать над готовностью к сотрудничеству, например для экономии вычислительной мощности или расхода заряда батареи.

4. Доверие является динамическим, а не статическим.

5. Доверие носит субъективный характер.

6. Доверие не обязательно транзитивно. Тот факт, что A доверяет B и B доверяет C , не означает, что A доверяет C .

7. Доверие асимметрично и не обязательно является взаимным.

8. Доверие зависит от контекста. A может доверять B в одном качестве и не доверять в другом. Например, для решения трудоёмкой вычислительной

задачи в MANET узел с высокой вычислительной мощностью будет рассматриваться как доверенный, в то время как узел, который имеет низкую вычислительную мощность, но не является вредоносным, будет рассматриваться как недоверенный.

В качестве одного из первых протоколов маршрутизации, основанных на установлении доверия и кооперации, был разработан протокол CORE [25]. Указанный протокол базируется на механизмах реактивного протокола маршрутизации DSR и предполагает определение каждым узлом прямой (на основе собственных наблюдений) и косвенной (на основе сообщений от других узлов) репутации других узлов. Кроме того, протокол вводит понятие функциональной репутации как репутации, связанной с одной определенной задачей (например, пересылка пакетов), и глобальной репутации, которая вычисляется с учётом всех функциональных репутаций и их весовых коэффициентов. Протокол разработан для принятия решений о сотрудничестве или постепенной изоляции узла. Уникальной особенностью протокола CORE является то, что он предусматривает обмен только позитивной информацией о репутации, что, с одной стороны, позволяет обеспечить защиту от атак на «отказ в обслуживании», но, с другой стороны, оставляет возможность для кооперации злоумышленников в целях завышения своей репутации.

Другим расширением протокола DSR, построенным на основе концепции доверия и кооперации узлов, является протокол безопасной маршрутизации CONFIDANT [26]. Его реализация на каждом узле включает подсистему репутации, монитор, диспетчер маршрутов и менеджер доверия. Узлы, передающие пакеты, могут обнаруживать отклонения в поведении следующих по маршруту узлов с помощью механизма пассивного подтверждения или путем наблюдения за поведением протокола маршрутизации. Монитор каждого узла регистрирует отклонения от нормального поведения, и в тех случаях, когда регистрируется плохое поведение, вызывается подсистема репутации. В рамках доверительных отношений узлы также могут делиться этой информацией с соседними узлами, что подразумевает комбинированное определение уровня доверия узлов. Диспетчер доверия работает с таблицей аварийных сигналов, таблицей доверия и таблицей узлов.

Таблица аварийных сигналов включает информацию о принятых тревожных сигналах. В таблице доверия содержатся уровни доверия узлов, позволяющие определить достоверность принимаемых тревожных сигналов. В таблице узлов перечислены все узлы, отправляющие сигналы тревоги. Подсистема репутации управляет таблицей узлов, участвующих в передаче пакетов, и их уровнем доверия. Уровень доверия к узлу изменяется только тогда, когда злонамеренное поведение этого узла было зафиксировано несколько раз (выше некоторого порогового значения), чтобы исключить совпадения. Если уровень доверия к узлу ухудшится настолько, что выйдет из допустимого диапазона, будет вызван

диспетчер маршрутов, который выполнит пересчёт маршрута в соответствии с базовой метрикой безопасности (например, уровнем доверия).

Значительное количество расширений безопасности, построенных на основе концепции доверия, предложено для реактивного протокола AODV. Например, в работе [27] предложен адаптивный протокол, предусматривающий определение коэффициента доверия для каждого узла и требуемого уровня безопасности данных. В рамках указанного протокола предлагается определять уровень доверия к узлам и использовать различную длину ключа шифрования для различных сообщений протокола AODV в зависимости от уровня доверия к узлам и требуемого уровня безопасности для передаваемых данных, что позволит снизить накладные расходы на криптографические преобразования. Вместе с тем в рамках указанного подхода не рассматривается методика определения самого коэффициента доверия.

Протокол TAODV (Trusted AODV) [28] также является модификацией протокола AODV, его главное отличие – установление доверительных отношений между всеми узлами сети. Текущий узел выбирает для последующей передачи только те узлы, с которыми установлены доверительные отношения. Узлы, преднамеренно выполняющие неправомерные действия, после обнаружения будут изолированы.

Модель доверия, реализуемая в рамках протокола TAODV, основывается на трехмерной метрике:

$$\omega_B^A = (b_B^A, d_B^A, u_B^A),$$

где ω_B^A – мнение узла A об узле B ; b – степень доверия; d – степень недоверия; u – степень неуверенности. Причем

$$b_B^A + d_B^A + u_B^A = 1.$$

В этом выражении степень доверия характеризует вероятность, с которой узел A может доверять узлу B , а степень недоверия характеризует вероятность, с которой узел A не может доверять узлу B . Тогда степень неуверенности определяет случаи, в которых отсутствуют как доверие, так и недоверие, причем сумма этих трех элементов равняется 1.

Пусть p – количество успешных взаимодействий, а n – количество безрезультатных взаимодействий узла A с узлом B . Тогда мнение узла A об узле B вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} b_B^A = \frac{p}{p+n+2}, \\ d_B^A = \frac{n}{p+n+2}, \\ u_B^A = \frac{2}{p+n+2}. \end{cases}$$

Модель при этом является динамической, поскольку мнения узлов со временем изменяются. Протокол предполагает сотрудничество узлов при вычислении каждым узлом указанной трехмерной метрики. Данное сотрудничество реализуется посредством специальных служебных сообщений:

TREQ – широковещательный запрос мнения, TREP – предоставление мнения. В рамках предложенной модели каждый раз при получении управляющих пакетов базового протокола от узла *B*, узел *A* посредством запросов TREQ и ответов TREP собирает мнения всех соседних узлов об узле *B* и объединяет их все, включая уже имеющееся мнение узла *A* об узле *B*, на базе операций дисконтирования и согласования.

Дисконтирование мнения узла *B* об узле *C* при определении мнения узла *A* об узле *C* производится по следующим правилам:

$$\begin{cases} b_C^{AB} = b_B^A b_C^B, \\ d_C^{AB} = b_B^A d_C^B, \\ u_C^{AB} = d_B^A + u_B^A + b_B^A u_C^B. \end{cases}$$

Согласование мнений узлов *A* и *B* об узле *C* производится по следующим правилам:

$$\begin{cases} b_C^{A,B} = (b_C^A u_C^B + b_C^B u_C^A) / k, \\ d_C^{A,B} = (d_C^A u_C^B + d_C^B u_C^A) / k, \\ u_C^{A,B} = (u_C^A u_C^B) / k, \\ k = u_C^A + u_C^B - 2u_C^A u_C^B. \end{cases}$$

Дальнейшие действия узла *A* зависят от сформированного мнения об узле *B*. Причем решение принимается на основе предложенных в рамках протокола критериев (таблица).

Критерии для оценки доверия

Степень доверия	Степень недоверия	Степень неуверенности	Действие
		>0,5	Запросить и проверить цифровую подпись
	>0,5		Изолировать узел на определенный период
>0,5			Доверять узлу и осуществлять маршрутизацию
<0,5	<0,5	<0,5	Запросить и проверить цифровую подпись

Протокол также предусматривает модификацию управляющих пакетов запроса и предоставления маршрутов (TRREQ и TRREP) исходного протокола AODV за счёт включения дополнительных полей для реализации модели и расширение таблицы маршрутизации за счёт трех дополнительных полей для каждой записи узла: количество успешных взаимодействий, количество безрезультатных взаимодействий, значение метрики (мнение).

Аналогичный, но значительно упрощенный подход использован в рамках протокола GradeTrust [29]. Протокол не предполагает кооперации узлов при вычислении уровня доверия, но предусматривает классификацию всех узлов сети в соответствии с уровнем доверия к ним на три равные группы для того, чтобы минимизировать количество маршрутизируемых пакетов через узлы с низким уровнем доверия. Несмотря на минимальные накладные расхо-

ды, такой подход не может гарантировать достаточный уровень защиты даже от атак типа «грейхол».

Применение концепции доверия возможно не только в рамках реактивных протоколов маршрутизации, но также для обеспечения защиты проактивных и гибридных протоколов маршрутизации. В частности, в работе [30] предлагается комбинированное обеспечение защиты проактивного протокола маршрутизации OLSR на основе криптографических механизмов и концепции доверия. Аутентификация всех сообщений протокола производится на основе электронной подписи, генерируемой отправителем. Каждый узел предоставляет свой открытый ключ при установлении соседских отношений с другими узлами. Кроме того, обеспечение защиты указанного протокола строится на валидации сообщений HELLO и TC всех узлов и пакетов данных, маршрутизируемых шлюзами MPR. Каждый узел устанавливает доверительные отношения со всеми симметричными соседями, предоставляющими корректную информацию. В рамках обеспечения безопасности протокола OLSR любой узел, во-первых, контролирует поведение соседних узлов на его соответствие спецификациям протокола, а во-вторых, производит контроль поведения выбранных шлюзов MPR. Выбор шлюзов MPR является критичной операцией, поскольку именно шлюзы MPR осуществляют маршрутизацию пакетов для каждого узла и обеспечивают доступность узла для удаленных узлов. Контроль поведения соседних узлов производится исходя из следующих свойств протокола:

1. Узлы-селекторы некоторого шлюза MPR, объявляемые в сообщении TC, должны являться симметричными соседями этого шлюза.
2. Каждый шлюз MPR, объявляющий некоторый узел-селектор в сообщении TC, должен быть объявлен как соседний шлюз MPR в сообщении HELLO указанного узла-селектора.
3. При пересылке шлюзом MPR сообщений TC или пакетов данных некоторого узла перенаправленное сообщение должно быть идентично сообщению, сгенерированному самим узлом.

Контроль поведения выбранных шлюзов MPR производится исходя из следующих свойств протокола.

1. Каждый выбранный шлюз MPR должен генерировать сообщения TC, правильно объявляющие его узлы-селекторы.
2. Каждый выбранный шлюз MPR должен осуществлять маршрутизацию пакетов данных и управляющих сообщений TC, отправленных его селекторами.

Корреляция между полученными сообщениями позволяет узлам проверять указанные свойства. В случае обнаружения нарушений некоторым соседним узлом указанных свойств доверительные и соседские отношения с этим узлом могут быть разорваны. В случае обнаружения нарушений выбранным шлюзом MPR указанных свойств узел теряет соответствующий статус и доверительные отноше-

ния с этим узлом также разрываются. Кроме того, при обнаружении нарушений узлы генерируют широковещательные оповещения, прилагая в качестве доказательства подписанные сообщения, свидетельствующие о нарушении. Кооперация узлов позволяет распространять по сети указанные оповещения и использовать их для изоляции эгоистичных узлов и узлов-нарушителей.

Альтернативный подход к обеспечению безопасности OLSR на основе концепции доверия представлен в работе [31]. В предложенной модели оценка уровня доверия узлов производится на основе нечетких сетей Петри. Кроме того, авторами предложен алгоритм выбора пути с максимальным уровнем доверия среди всех возможных путей. Для организации сотрудничества узлов в целях реализации указанной модели в работе предложена расширенная версия исходного протокола FPNT-OLSR.

Перспективный подход к защите протоколов маршрутизации от атак типа «блекхол» и «синкхол» предложен в рамках схемы ActiveTrust [32]. Суть подхода заключается в активном выявлении нарушителей в ходе предварительного установления множества маршрутов до получателя. Выявление нарушителей происходит в результате расчёта уровня доверия к маршрутизирующим узлам на основе полученных от других узлов рекомендаций и сравнения рассчитанного уровня доверия с некоторым пороговым значением.

Основные положения концепции доверия также широко используются в целом ряде других работ, предназначенных для обнаружения атак на протоколы маршрутизации в телекоммуникационных сетях с динамической топологией [33–36].

Выводы и анализ направлений для дальнейших исследований

Исходя из представленного анализа, можно сделать вывод, что для обеспечения безопасности протоколов маршрутизации в телекоммуникационных сетях с динамической топологией требуется комбинированное применение рассмотренных подходов, включая механизмы криптографической защиты и применение подхода, основанного на концепции доверия и кооперации узлов. Выбор безопасного маршрута для доставки пакетов может основываться на уровне безопасности узлов, обоснованным также выглядит применение многопутевой маршрутизации. Для минимизации накладных расходов степень применяемых криптографических преобразований может зависеть от уровня репутации узлов и общей безопасности маршрута. При этом ряд проблем, связанных с применением концепции доверия, остаются открытыми и требуют дальнейших исследований.

1. Большинство уже разработанных протоколов и моделей обеспечения безопасности маршрутизации в рамках применения концепции доверия в основном полагаются на отслеживание сброшенных пакетов в результате реализации рассмотренных сетевых атак. Такой подход не позволяет отслеживать сетевые атаки, связанные со злонамеренным

ухудшением качества маршрутов, включая необоснованную мобильность и внесение дополнительных задержек при передаче пакетов. Также редко учитываются социальные характеристики узлов сети, что позволяет внутренним нарушителям игнорировать сотрудничество с другими узлами (проблема эгоистичности) либо злонамеренно распространять ошибочные сигналы или рекомендации. Решение указанных проблем возможно в результате обеспечения маршрутизации с множественными ограничениями, включая ограничения по качеству каналов связи и социальным свойствам узлов сети, что является вычислительно сложной задачей. Альтернативный вариант решения требует разработки комплексной метрики маршрутизации, объединяющей в себе критерии качества маршрутов, специализированные для сетей с динамической топологией, а также социальные характеристики узлов сети, формирующих маршруты доставки пакетов.

2. Необходимы методы определения оптимального порогового значения уровня репутации или комплексной метрики маршрутов в различных сценариях. Очевидно, что указанное пороговое значение будет определять эффективность реализации концепции доверия и безопасность маршрутизации в целом. Правильный выбор порогового значения позволит минимизировать количество ошибок первого и второго рода и тем самым обеспечить эффективность и безопасность маршрутизации. Решение указанной проблемы требует определения перечня факторов, влияющих на доверительный порог.

3. Трудно оценить влияние доверия на эффективность маршрутизации. Очевидно, что недостаточный уровень доверия к некоторым узлам сети может приводить к выбору менее производительных маршрутов в целях обеспечения безопасности маршрутизации. Для решения указанной проблемы требуется определить, как можно минимизировать негативный эффект концепции доверия на производительность сетевого взаимодействия.

4. Эффективность применяемой модели обеспечения безопасности маршрутизации во многом может зависеть от архитектуры, назначения и свойств рассматриваемой динамически организуемой сети. Выбор адекватного решения в каждом конкретном сценарии также представляет серьёзную задачу.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2592.2018.9.

Литература

1. Cunha F. Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges / F. Cunha, Villas L., Boukerche A. et al. // Ad Hoc Networks. – 2016. – Vol. 44. – P. 90–103.
2. Bekmezci I. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey / I. Bekmezci, O.K. Sahingoz, S. Temel // Ad Hoc Networks. – 2013. – Vol. 11, No. 3. – P. 1254–1270.
3. Perkins C.E. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers / C.E. Perkins, P. Bhagwat // Proc. of SIGCOMM'94 Conf. on

- Communications Architectures, Protocols and Applications. – 1994. – P. 234–244.
4. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks / P. Jacquet et al. // Proc. of IEEE INMIC 2001 Multi Topic Conf. – 2001. – P. 62–68.
5. RFC7181: The Optimized Link State Routing Protocol Version 2 / T. Clausen, C. Dearlove, P. Jacquet, U. Herberg. – 2014. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7181> (дата обращения: 01.06.2018).
6. Perkins C.E. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. No. RFC 3561 / C.E. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das. – 2003. – URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561> (дата обращения: 01.06.2018).
7. Johnson D.B. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks / D.B. Johnson, D.A. Maltz // Mobile Computing. – 1996. – Vol. 353. – P. 153–181.
8. Haas Z.J. The Routing Algorithm for the Reconfigurable Wireless Networks // Proc. of IEEE ICUPC 1997 Conf. – 1997. – Vol. 2. – P. 562–566.
9. Karlof C. Secure routing in wireless sensor networks: Attacks and countermeasures / C. Karlof, D. Wagner // Ad Hoc Networks. – 2003. – Vol. 1, No. 2-3. – P. 293–315.
10. Pathan A.S.K. Security of self-organizing networks: MANET, WSN, WMN, VANET. – New York: CRC Press, 2016. – 638 p.
11. Clausen T. Security Threats to the Optimized Link State Routing Protocol Version 2 (OLSRv2). No. RFC 8116 / T. Clausen, U. Herberg, J. Yi. – 2017. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc8116> (дата обращения: 01.06.2018).
12. Zapata M.G. Secure ad hoc on-demand distance vector routing / M.G. Zapata, N. Asokan // ACM Mobile Computing and Communications Review. – 2002. – Vol. 6, No. 3. – P. 106–107.
13. A secure routing protocol for ad hoc networks / K. Sanzgiri et al. // Proc. of 10th IEEE International Conference on Network Protocols. – 2002. – P. 78–87.
14. Securing the OLSR protocol / C. Adjih et al. // Proc. of Med-Hoc-Net. – 2003. – P. 25–27.
15. Papadimitratos P. Secure link state routing for mobile ad hoc networks / P. Papadimitratos, Z.J. Haas // Proc. of Symposium on Applications and the Internet Workshops. – 2003. – P. 379–383.
16. Papadimitratos P. Secure routing for mobile ad hoc networks / P. Papadimitratos, Z.J. Haas // Proc. of SCS Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conf. (CNDS 2002). – 2002. – P. 1–12.
17. Hu Y.C. SEAD: Secure efficient distance vector routing for mobile wireless ad hoc networks / Y.C. Hu, D.B. Johnson, A. Perrig // Ad Hoc Networks. – 2003. – Vol. 1(1). – P. 175–192.
18. Merkle R.C. A digital signature based on a conventional encryption function // Conf. on the Theory and Application of Cryptographic Techniques. – 1987. – P. 369–378.
19. Wang J.W. A secure DSDV routing protocol for ad hoc mobile networks / J.W. Wang, H.C. Chen, Y.P. Lin // Proc. of Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC, 2009 (NCM'09). – 2009. – P. 2079–2084.
20. Yi S. Security-aware ad hoc routing for wireless networks / S. Yi, P. Naldurg, R. Kravets // Proc. of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing. – 2001. – P. 299–302.
21. Shcherba E.V. A role-based approach to secure routing in wireless ad-hoc networks / E.V. Shcherba, V.I. Nikonov // Proc. of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), IEEE. – 2016. – P. 1–5.
22. Lou W. SPREAD: Improving network security by multipath routing / W. Lou, W. Liu, Y. Fang // Military Communications Conf., 2003 (MILCOM'03). – 2003. – Vol. 2. – P. 808–813.
23. Shamir A. How to share a secret // Communications of the ACM. – 1979. – Vol. 22(11). – P. 612–613.
24. Cho J.H. A survey on trust management for mobile ad hoc networks / J.H. Cho, A. Swami, R. Chen // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2011. – Vol. 13, No. 4. – P. 562–583.
25. Michiardi P. CORE: A Collaborative Reputation Mechanism to Enforce Node Cooperation in Mobile Ad Hoc Networks / P. Michiardi, R. Molva // Advanced communications and multimedia security. – 2002. – P. 107–121.
26. Buchegger S. Performance analysis of the CONFIDANT protocol / S. Buchegger, J.Y. Le Boudec // Proc. of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing. – 2002. – P. 226–236.
27. Nekkanti R.K. Trust based adaptive on demand ad hoc routing protocol / R.K. Nekkanti, C.W. Lee // Proc. of the 42nd annual Southeast regional conference. – 2004. – P. 88–93.
28. Li X. A trust model based routing protocol for secure ad hoc networks / X. Li, M.R. Lyu, J. Liu // Proc. of Aerospace Conference, 2004, IEEE. – 2004. – Vol. 2. – P. 1286–1295.
29. Airehrour D. GradeTrust: A secure trust based routing protocol for MANETs / D. Airehrour, J. Gutierrez, S.K. Ray // Proc. of 2015 International Telecommunication Networks and Applications Conf. (ITNAC), IEEE. – 2015. – P. 65–70.
30. Adnane A. Trust-based security for the OLSR routing protocol / A. Adnane, C. Bidan, R.T. de Sousa Júnior // Computer Communications. – 2013. – Vol. 36(10-11). – P. 1159–1171.
31. Tan S. Trust based routing mechanism for securing OLSR-based MANET / S. Tan, X. Li, Q. Dong // Computer Communications. – 2015. – Vol. 30. – P. 84–98.
32. ActiveTrust: Secure and trustable routing in wireless sensor networks / Y. Liu, M. Dong, K. Ota, A. Liu // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2016. – Vol. 11, No. 9. – P. 2013–2027.
33. Enhanced trust aware routing against wormhole attacks in wireless sensor networks / R.W. Anwar et al. // Proc. of 2015 International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA), IEEE. – 2015. – P. 56–59.
34. Naderi O. A trust based routing protocol for mitigation of sinkhole attacks in wireless sensor networks / O. Naderi, M. Shahedi, S.M. Mazinani // International Journal of Information and Education Technology. – 2015. – Vol. 5, No. 7. – P. 520–526.
35. Poongodi M. A novel intrusion detection system based on trust evaluation to defend against DDoS attack in MANET / M. Poongodi, S. Bose // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2015. – Vol. 40, No. 12. – P. 3583–3594.
36. Ishmanov F. Trust Mechanisms to Secure Routing in Wireless Sensor Networks: Current State of the Research and Open Research Issues / F. Ishmanov, Y. Bin Zikria // Journal of Sensors. – 2017. – Vol. 2017. – P. 1–16.

Щерба Евгений Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф.

комплексной защиты информации (КЗИ)

Омского государственного технического ун-та (ОмГТУ)

Мира пр-т, д. 11, г. Омск, Россия, 644050

ORCID 0000-0003-4401-4343

Тел.: +7 (381-2) 21-77-02

Эл. почта: evscherba@gmail.com

Никонов Вячеслав Игоревич

Канд. техн. наук, доцент каф. средств связи и информационной безопасности (ССИБ) ОмГТУ
 Мира пр-т, д. 11, г. Омск, Россия, 644050
 Тел.: +7 (381-2) 65-85-60
 Эл. почта: vi.nikonov@gmail.com

Литвинов Георгий Александрович

Магистрант каф. ССИБ ОмГТУ
 Мира пр-т, д. 11, г. Омск, Россия, 644050
 Тел.: +7 (381-2) 65-85-60
 Эл. почта: georgyfund@gmail.com

Shcherba E.V., Nikonov V.I., Litvinov G.A.
Securing Routing Protocols for Wireless Networks with Dynamic Topology

The presented paper contains a comparative survey of current security threats and approaches applied to the protection of routing protocols for telecommunication networks with dynamic topology, including MANET, WSN, and other types of networks. More than 20 significant and promising routing protocols are considered in the paper. Cryptographic protection and protection based on the concept of trust are the basic approaches to ensure the security of these protocols. The authors highlight the advantages, disadvantages and vulnerabilities of the protocols examined, and also identify promising areas for further research.

Keywords: wireless ad-hoc networks, MANET, VANET, FANET, WSN, routing vulnerabilities, network security.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-19-29

References

- Cunha F., Villas L., Boukerche A., Maia G., Viana A., Mini R.A., Loureiro A.A. Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges. *Ad Hoc Networks*, 2016, vol. 44, pp. 90–103.
- Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270.
- Perkins C.E., Bhagwat P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. *Proc. of SIGCOMM'94 Conf. on Communications Architectures, Protocols and Applications*, 1994, pp. 234–244.
- Jacquet P., Muhlethaler P., Clausen T., Laouiti A., Qayyum A., Viennot L. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. *Proc. of IEEE INMIC 2001 Multi Topic Conf.*, 2001, pp. 62–68.
- Clausen T., Dearlove C., Jacquet P., Herberg U. RFC7181: The Optimized Link State Routing Protocol Version 2. 2014. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc7181> (accessed: 01.06.2018).
- Perkins C.E., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. No. RFC 3561, 2003. Available at: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561> (accessed: 01.06.2018).
- Johnson D.B., Maltz D.A. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. *Mobile Computing*, 1996, vol. 353, pp. 153–181.
- Haas Z.J. The Routing Algorithm for the Reconfigurable Wireless Networks. *Proc. of IEEE ICUPC 1997 Conf.*, 1997, vol. 2, pp. 562–566.
- Karlof C., Wagner D. Secure routing in wireless sensor networks: Attacks and countermeasures. *Ad Hoc Networks*, 2003, vol. 1, no. 2-3, pp. 293–315.
- Pathan A.S.K. *Security of self-organizing networks: MANET, WSN, WMN, VANET*. New York, CRC Press, 2016, 638 p.
- Clausen T., Herberg U., Yi J. Security Threats to the Optimized Link State Routing Protocol Version 2. No. RFC 8116, 2017. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc8116> (accessed: 01.06.2018).
- Zapata M.G., Asokan N. Secure ad hoc on-demand distance vector routing. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 2002, vol. 6, no. 3, pp. 106–107.
- Sanzgiri K., Dahill B., Levine B.N., Shields C., Belding-Royer E.M. A secure routing protocol for ad hoc networks. *Proc. of 10th IEEE International Conference on Network Protocols*, 2002, pp. 78–87.
- Adjih C., Clausen T., Jacquet P., Laouiti A., Muhlethaler P., Raffo D. Securing the OLSR protocol. *Proc. of Med-Hoc-Net*, 2003, pp. 25–27.
- Papadimitratos P., Haas Z.J. Secure link state routing for mobile ad hoc networks. *Proc. of Symposium on Applications and the Internet Workshops*, 2003, pp. 379–383.
- Papadimitratos P., Haas Z.J. Secure routing for mobile ad hoc networks. *Proc. of SCS Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conf. (CNSD 2002)*, 2002, pp. 1–12.
- Hu Y.C., Johnson D.B., Perrig A. SEAD: Secure efficient distance vector routing for mobile wireless ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2003, vol. 1(1), pp. 175–192.
- Merkle R.C. A digital signature based on a conventional encryption function. *Proc. of Conf. on the Theory and Application of Cryptographic Techniques*, 1987, pp. 369–378.
- Wang J.W., Chen H.C., Lin Y.P. A secure DSDV routing protocol for ad hoc mobile networks. *Proc. of Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC*, 2009 (NCM'09), 2009, pp. 2079–2084.
- Yi S., Naldurg P., Kravets R. Security-aware ad hoc routing for wireless network. *Proc. of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, 2001, pp. 299–302.
- Shcherba E.V., Nikonov V.I. A role-based approach to secure routing in wireless ad-hoc networks. *Proc. of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, IEEE, 2016, pp. 1–5.
- Lou W., Liu W., Fang Y. SPREAD: Improving network security by multipath routing. *Proc. of Military Communications Conf., 2003 (MILCOM'03)*, 2003, vol. 2, pp. 808–813.
- Shamir A. How to share a secret. *Communications of the ACM*, 1979, vol. 22(11), pp. 612–613.
- Cho J.H., Swami A., Chen R. A survey on trust management for mobile ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, vol. 13, no. 4, pp. 562–583.
- Michiardi P., Molva R. CORE: A Collaborative Reputation Mechanism to Enforce Node Cooperation in Mobile Ad Hoc Networks. *Advanced communications and multimedia security*, 2002, pp. 107–121.
- Buchegger S., Le Boudec J.Y. Performance analysis of the CONFIDANT protocol. *Proc. of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, 2002, pp. 226–236.
- Nekkanti R.K., Lee C.W. Trust based adaptive on demand ad hoc routing protocol. *Proc. of the 42nd annual Southeast regional conference*, 2004, pp. 88–93.
- Li X., Lyu M.R., Liu J. A trust model based routing protocol for secure ad hoc networks. *Proc. of Aerospace Conference, 2004*, IEEE, 2004, vol. 2, pp. 1286–1295.
- Airehrour D., Gutierrez J., Ray S.K. GradeTrust: A secure trust based routing protocol for MANETs. *Proc. of 2015 International Telecommunication Networks and Applications Conf. (ITNAC)*, IEEE, 2015, pp. 65–70.

30. Adnane A., Bidan C., de Sousa Júnior R.T. Trust-based security for the OLSR routing protocol. *Computer Communications*, 2013, vol. 36 (10-11), pp. 1159–1171.

31. Tan S., Li X., Dong Q. Trust based routing mechanism for securing OSLR-based MANET. *Computer Communications*, 2015, vol. 30, pp. 84–98.

32. Liu Y., Dong M., Ota K., Liu A. ActiveTrust: Secure and trustable routing in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2016, vol. 11, no. 9, pp. 2013–2027.

33. Anwar R.W., Bakhtiari M., Zainal A., Abdullah A.H., Qureshi K.N. Enhanced trust aware routing against wormhole attacks in wireless sensor networks. *Proc. of 2015 International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA)*, IEEE, 2015, pp. 56–59.

34. Naderi O., Shahedi M., Mazinani S.M. A trust based routing protocol for mitigation of sinkhole attacks in wireless sensor networks. *International Journal of Information and Education Technology*, 2015, vol. 5, no. 7, pp. 520–526.

35. Poongodi M., Bose S. A novel intrusion detection system based on trust evaluation to defend against DDoS attack in MANET. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, vol. 40, no. 12, pp. 3583–3594.

36. Ishmanov F., Bin Zikria Y. Trust Mechanisms to Secure Routing in Wireless Sensor Networks: Current State of the Research and Open Research Issues. *Journal of Sensors*, 2017, vol. 2017, pp. 1–16.

Evgeny V. Shcherba

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Complex Information Security, Omsk State Technical University (OmSTU)
11, Mira pr., Omsk, Russia, 644050
ORCID 0000-0003-4401-4343
Phone: +7 (381-2) 21-77-02
Email: evscherba@gmail.com

Vyacheslav I. Nikonov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Communications and Information Security OmSTU
11, Mira pr., Omsk, Russia, 644050
Phone: +7 (381-2) 65-85-60
Email: vi.nikonov@gmail.com

George A. Litvinov

Graduate student, Department of Communications and Information Security OmSTU
11, Mira pr., Omsk, Russia, 644050
Phone: +7 (381-2) 65-85-60
Email: georgyfunds@gmail.com

УДК 004.056.57

Д.Г. Буханов, Д.В. Сулохин

Выявление вредоносного программного обеспечения на основе классификации графов потоков исходных кодов

Произведен анализ существующих подходов к выявлению вредоносного программного обеспечения, определены их недостатки. Предложен подход классификации программного обеспечения в компьютерных системах обработки информации. Предложенный подход предполагает три шага: построение графа потока выполнения исходного кода приложения, векторизацию полученного графа, классификацию графа на основе использования искусственной нейронной сети адаптивно-резонансной теории. Векторизация графа происходит на основе модели bags-of-words. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования предложенного подхода в задачах определения вредоносного программного обеспечения.

Ключевые слова: шаблон, выявление вредоносного программного обеспечения, граф потока выполнения, нейронная сеть, классификация данных.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-30-34

Обнаружение вредоносного программного обеспечения (ПО) является актуальной проблемой в области обеспечения информационной безопасности. На текущий момент известно два класса методов обнаружения вредоносного ПО: статический анализ и динамический анализ [1]. Для статического анализа производят поиск сигнатуры вредоносной программы в машинном коде исполняемого файла [2]. При динамическом анализе прибегают к использованию виртуальных машин для эмуляции работы процесса в виртуальном окружении и последующего анализа его поведения в системе [3].

Как статический, так и динамический анализ исполняемых файлов имеют свои недостатки. Для защиты от статического анализа создатели вредоносного ПО прибегают к методам обфускации [4] и самомодификации исходного кода [5], его упаковки и шифрования [6]. В случае динамического анализа существенным недостатком является то, что вредоносная программа может нанести вред только после прямого воздействия пользователя на систему, а до этого времени выдает себя за безопасное ПО.

Существует подход к анализу поведения процесса с помощью выделения графа потока выполнения (Control-Flow Graph, CFG) его исполняемого кода. В работе [7] описан алгоритм построения CFG для приложения, представленного в виде ассемблерного кода, путем анализа инструкций, перенаправляющих поток по другому адресу. По построенному графу можно провести сигнатурный анализ. Под сигнатурой CFG понимается остовное дерево (дерево, полученное из графа путем удаления циклических ребер), вершинами которого являются вершины графа.

В работе [7] в качестве базы сигнатур используют конечный автомат, состоящий из конечного набора таких деревьев, на вход которому подается граф потока выполнения анализируемого ПО. Следует отметить, что вредоносная программа, заражая легитимное ПО, внедряет свой код в тело программы, таким образом, граф потока выполнения вредоносной программы является подграфом CFG ориги-

нальной программы. Для более глубокого анализа, на вход в автомат подают не только CFG анализируемой программы, но и его подграфы.

Альтернативный подход для статического анализа графа потока выполнения описан в работе [8], где в качестве функции сравнения вершин графов выступает функция

$$\text{Match}(B_i, B_j) = \frac{LCB(B_i, B_j)}{\text{length}(B_j)} \times 100\%,$$

где B_i , B_j – вершины сравниваемых графов; $\text{length}(B_j)$ – общее количество символов в ассемблерном коде вершины B_j ; $LCB(B_i, B_j)$ – максимальное количество символов в блоке B_i , которые совпадают с символами в блоке B_j . Процент соответствия вершины одного графа вершине другого графа сохраняется в матрице A размера $m \times n$, как результат сравнения кода программы P_a и P_b . Итоговая оценка соответствия рассчитывается по формуле

$$\text{score} = \frac{\sum_{i=j, j=0}^n a_{ij}}{L},$$

где a_{ij} – диагональные элементы матрицы A ; L – общее количество вершин.

Недостатками такого подхода являются:

- большой объем базы данных сигнатур образцов вредоносного ПО;
- сложность процесса построения графа из-за наличия в исходном коде программы инструкций, аргументы которых требуют предварительного вычисления;
- большие временные затраты на поиск сигнатуры в базе сигнатур.

Решением недостатка оптимизации базы данных (БД) сигнатур вредоносного ПО является разработка системы классификации на основе искусственных нейронных сетей. Такой подход позволит не только оптимизировать размер БД, но и использовать более эффективный способ сопоставления сигнатуры вредоносного ПО с образцами в БД в сравнении с определением изоморфизма графов.

Такие подходы зачастую оперируют множеством числовых параметров. Для анализа графа требуется получить его численное представление в виде вектора чисел, т.е. нужно выделить множество вещественных или целочисленных параметров, которые будут характеризовать граф потока выполнения.

В работе [9] рассматривают метод классификации графов с помощью алгоритма `graph2vec`. Для векторизации графа применяется подход, в котором считается количество уникальных вершин графа и из полученных результатов формируется конечный вектор. Причем процедура сравнения двух вершин включает в себя сравнение целочисленных векторов, полученных из вершины путем подсчета количества входящих ассемблерных инструкций архитектуры `x86` в заголовке вершины.

Построение графа потока выполнения

Граф потока выполнения представляет собой модель поведения процесса в системе. Вершинами графа являются непрерывные участки ассемблерного кода, в которых отсутствуют операции перенаправления потока выполнения. В архитектуре процессоров `x86` можно выделить следующие инструкции, перенаправляющие поток выполнения на другой участок памяти:

- инструкции условного и безусловного перехода (`jmp`, `jcc`, и т.п.);
- инструкция `call`;
- инструкция `ret`;
- инструкция `loop`.

Каждая из них при построении CFG добавляет новую вершину в граф. Исключением являются инструкции условного перехода (`jmp`, `jcc`, `jnz`, и т.п.), которые перенаправляют поток сразу в две вершины. Адрес начальной инструкции первой вершины – это адрес перехода в инструкции условного перехода, а начальным адресом второй является значение суммы адреса инструкции условного перехода и `0x1`. Так, например:

```
0x0004FF8    jnz 0x0004FF0.
```

Этот ассемблерный код добавляет в граф потока две новые вершины:

- с начальным адресом `0x0004FF0`;
- с начальным адресом `0x0004FF9`.

Слева на рис. 1 изображен пример ассемблерного кода, который состоит из семи инструкций `x86-64` архитектуры, а также граф потока выполнения, который получается на основе преобразования этих демонстрационных инструкций.

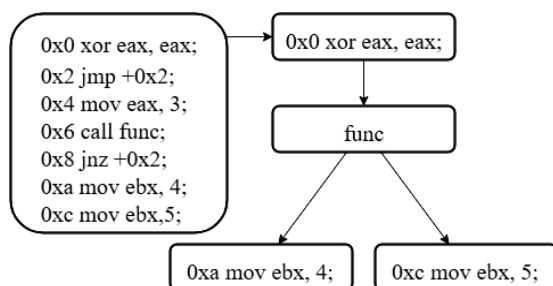


Рис. 1. Пример построения графа потока выполнения

Первая инструкция от точки входа в приложение попадает в начальную вершину графа. Следующая инструкция безусловного перехода добавляет новую пустую вершину в граф, которую можно не включать в него, так как это не имеет практического смысла. Следующая инструкция вызывает функцию `func` (для упрощения примера ассемблерный код функции не приводится), которая также добавляет в граф новую вершину. Выполнение функции `func` завершается командой `ret`, которая создаст новую пустую вершину. После идет условный переход по относительному адресу `+0x2`. Эта инструкция добавляет в граф две вершины с соответствующим ассемблерным кодом.

Графовое представление вредоносного ПО, как в случае анализа сигнатур, меняет свою форму, если используются методы обфускации, шифрования, упаковки исходного кода программы [10]. Для доступа к инструкциям исходного кода ПО используются различные подходы с применением распаковщиков и песочниц [11–13].

Ассемблерный код необходимо привести к нормальной форме, проведя деобфускацию кода. В работе [6] описан процесс нормализации ассемблерного кода, который состоит из следующих шагов:

- удалить незначимые инструкции `por`;
- удалить пары `push eax`; `pop eax`, если регистр `eax` не был использован в промежутке между этими инструкциями;
- удалить пары `inc eax`; `dec eax`, если регистр `eax` не был использован в промежутке между этими инструкциями;
- эквивалентные инструкции `xor eax, eax`; `mov eax, 0` удалить из исходного кода ПО.

Одной из проблем построения графа потока выполнения является тот факт, что адреса переходов и вызовов функций могут быть как абсолютными (`jmp 0x0000f4f5`), так и вычисляемыми (`jmp eax`). Если адреса являются вычисляемыми и возможно вычислить абсолютный адрес перехода, нужно его заменить. Иначе эта инструкция игнорируется и процесс построения продолжается без её участия.

Классификация программного обеспечения при помощи методов интеллектуального анализа данных

Методы интеллектуального анализа данных успешно применяются в средствах обнаружения атак и вторжений, функционирующих в сетевой инфраструктуре. В работе [14] для анализа состояния компьютерной сети использовали классификатор, в основе которого лежит нейронная сеть на базе адаптивно резонансной теории (АРТ) [15]. АРТ сети типа АРТ-2 подходят для задач кластеризации, хранения и идентификации образов, представленных в форме непрерывных значений сигналов.

Выходной слой такой сети представляет собой набор нейронов, каждый из которых представляет один класс объектов. Таким образом, подавая на вход качественно похожие графовые модели, будут активизироваться соответствующие им нейроны

выходного слоя. В свою очередь, если же входной сигнал не активирует хотя бы один нейрон выходного слоя, то это значит, что на вход АРТ сети подается новый образ вредоносного ПО, для классификации которого в выходной слой этой нейронной сети добавляется новый нейрон. Такой подход позволяет уменьшить размер памяти, требующийся для хранения графов известного вредоносного ПО. Особенностью данного классификатора является то, что его можно использовать в системах реального времени, так как алгоритм обучения не затрагивает прошлую память и позволяет дообучать сеть в процессе функционирования.

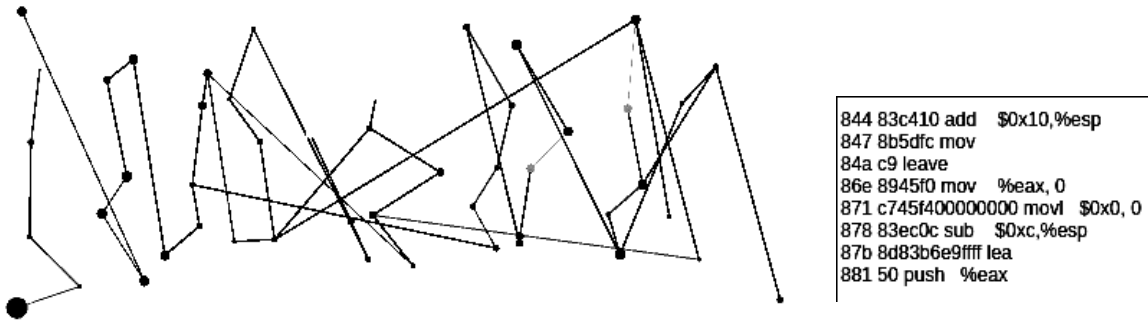


Рис. 2. Граф потока выполнения приложения, включающего в себя сетевые операции и операции доступа к файлам в системе. Содержимое одной вершины

Приложение, обладающее сравнительно простой логикой, в итоге представляет собой, достаточно большую сущность в виде графа. Для ускорения процесса построения графа возможно применение некоторых ограничений на количество вершин. В данном примере вершины графа содержат в себе наборы машинных инструкций, некоторые из которых изображены на рисунке справа.

В качестве способа векторизации полученного графа была использована модель bags-of-words. Используя преобразование графа в вектор, были получены следующие данные:

[11, 14, 23, 8, 52, 52, 52, 44, 44, 21, 21, 44, 23].

Для его классификации была использована сеть АРТ-2 показаны на рис. 3.

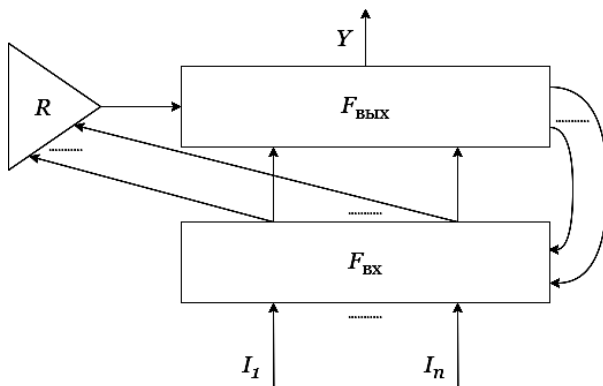


Рис. 3. Модель используемой нейронной сети типа АРТ-2

Основная идея заключается в том, что распознавание образов, представленных векторами $I^v = \{I_1, \dots, I_n\}$, является результатом частичного или

Результаты исследования

В рамках описанного выше алгоритма для построения графа потока выполнения была разработана программа, на вход которой подается дизассемблированный код исполняемого файла с набором инструкций x86-64, а результатом работы является граф потока выполнения этого исполняемого файла.

На рис. 2 изображен граф потока выполнения для простого приложения, совершающего операции сетевого подключения к удаленной машине и чтения системных файлов. При построении графа количество вершин, входящих в него, напрямую зависит от размера исходного исполняемого файла.

полного соответствия состояния весов одного из обученных распознающих нейронов входному нормализованному вектору, т.е. вхождения в резонанс сенсорного ($F_{вх}$) и распознающего ($F_{вых}$) слоев сети. Возникший резонанс оценивается управляющими нейронами (R).

Если оценка резонанса управляющими нейронами R достаточна, т.е. превышает заранее определенный порог, то считается, что соответствие между вектором входных данных и образом из памяти сети (Y) установлено.

На рис. 4 изображен график зависимости времени распознавания нового вектора от количества разных ранее обученных векторов. По оси абсцисс изображено количество различных запомненных векторов, по оси ординат – время распознавания поданного образа.

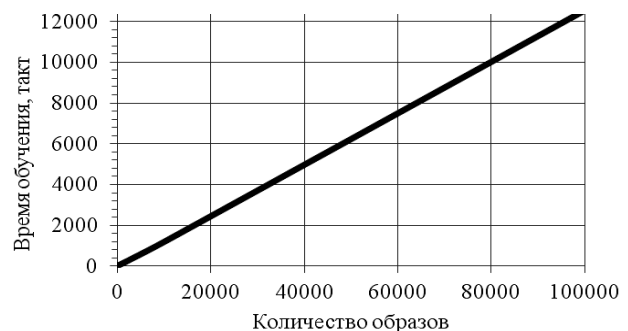


Рис. 4. График зависимости времени распознавания нового вектора от количества разных обученных векторов

Для эксперимента были сгенерированы 2 различных класса состояний графа потока выполнения,

каждый из которых состоял из 6 тыс. образов. Каждый последующий образ генерировался путем добавления дополнительных инструкций. Класс вредоносного программного обеспечения базировался на том, что не выполнял закрытие сетевого сокета и освобождение файлового дескриптора.

В ходе эксперимента были получены следующие результаты: программное обеспечение, которое не являлось вредоносным, классифицировалось с точностью 0,97, а вредоносное программное обеспечение – с точностью 0,95. Небольшое расхождение при классификации можно пояснить наличием случайных факторов добавления новой инструкции, которые при большом количестве смещали восприятие памяти АРТ (У).

Из графика и полученных данных классификации видно, что использование в качестве классификатора АРТ-2 показывает результаты, на основе которых можно сделать вывод о возможности использования предложенного подхода в системах реального времени.

Заключение

В работе был предложен подход классификации вредоносного ПО с помощью построения графа потока выполнения ассемблерного кода. Предложен способ векторизации графа и дальнейшего его анализа. Эффективность системы обнаружения вредоносного ПО при таком подходе к векторизации графового представления зависит от функции эквивалентности векторных представлений, в работе применялся подход попарного сравнения элементов, который не дает положительных результатов при анализе сильно обфусцированных исходных кодов. Для повышения качества распознавания полиморфного вредоносного ПО было предложено использовать другой подход к сравнению векторных представлений (использование искусственных нейронных сетей для классификации численных векторов). В качестве классификатора была использована сеть АРТ-2. В отличие от большинства других искусственных сетей она не требует переобучения при добавлении нового класса распознаваемых образов. Проведенные эксперименты показывают возможность использования АРТ-2 в качестве классификатора вредоносного ПО. Такой подход позволяет создавать системы обнаружения вредоносного кода, работающие в режиме реального времени.

Литература

1. Sikorski M. Practical Malware Analysis. The Hands – On Guide to Detecting Malicious Software / M. Sikorski, A. Honig. – San Francisco: No Starch Press, 2012. – 766 p.
2. Харченко С.С. Сигнатурный анализ программного кода / С.С. Харченко, Е.М. Давыдова, С.В. Тимченко // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3. – С. 60–64.
3. Аветисян А.И. Технологии статического и динамического анализа уязвимостей программного обеспечения / А.И. Аветисян, А.А. Белеванцев, И.И. Чукаев // Вопросы кибербезопасности. – 2014. – Т. 4, № 3. – С. 20–28.
4. Linn C. Obfuscation of executable code to improve resistance to static disassembly / C. Linn, S. Debray // In Proceedings of the 10th ACM Conference on Computer and

Communications Security (CCS'03). – 2003. – P. 290–299. – URL: <http://www2.cs.arizona.edu/solar/papers/CCS2003.pdf> (дата обращения: 18.02.2018).

5. Cai H. Certified self-modifying code / H. Cai, Z. Shao, A. Vaynberg // Conf. on Prog. Lang. Design and Implementation (PLDI). – New York: ACM Press, 2007. – P. 66–77.

6. Cappaert J. Self-encrypting code to protect against analysis and tampering / J. Cappaert, N. Kisslerli, D. Schellekens, B. Preneel // 1st Benelux Workshop on Information and System Security. – 2006. – P. 14. – URL: <https://www.esat.kuleuven.be/cosic/publications/article-811.pdf> (дата обращения: 21.02.2018).

7. Bonfante G. Architecture of a Morphological Malware Detector / G. Bonfante, M. Kaczmarek, J. Marion // Journal in Computer Virology. – 2009. – Vol. 5, No. 3. – P. 263–270.

8. Vinod P. Static CFG Analyzer for Metamorphic Malware Code / P. Vinod // Proc. 2nd Int. Conf. Security of Information and Networks. – N.Y.: ACM SIGSAC, 2009. – P. 225–228.

9. Narayanan A. Subgraph2vec: Learning distributed representations of rooted sub-graphs from large graphs / A. Narayanan, M. Chandramohan, L. Chen, Y. Liu, and S. Saminathan // arXiv:1606.08928. – 2016. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1606.08928.pdf> (дата обращения: 23.02.2018).

10. Касперски К. Упаковщики исполняемых файлов в LINUX/BSD и методы борьбы с ними // Системный администратор. – 2006. – № 9. – URL: https://www.evilmfingers.com/publications/research_RU/linux-unpack.pdf (дата обращения: 27.02.2018).

11. Filiol E. Advanced viral techniques: mathematical and algorithmic aspects // Journal in Computer Virology. – 2009. – Vol. 5, No. 4. – P. 263–270.

12. Filiol E. Computer Viruses: from Theory to Applications. – Verlag: Springer-Verlag, 2005. – 411 p.

13. Ször P. The Art of Computer Virus Research and Defense. Hangerstown: Phoenix BookTech, 2005. – 744 p.

14. Буханов Д.Г. Определение состояния компьютерной сети на основе использования нейронных сетей арт / Д.Г. Буханов, В.М. Поляков, А.В. Смакаев // Вестник Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2017. – Т. 1, № 7. – С. 157–162.

15. Jain L. Innovations in ART Neural Networks / L. Jain, B. Lazzarini, U. Halici. – Heidelberg; New York: Physica-Verl, 2000. – 189 p.

Буханов Дмитрий Геннадьевич

Магистрант каф. программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем (ПОВТиАС) Белгородского государственного университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) Костюкова ул., д. 46, г. Белгород, Россия, 308012
Тел.: +7-904-084-93-66
Эл. почта: db.old.stray@gmail.com

Сулохин Дмитрий Васильевич

Студент 5-го курса каф. ПОВТиАС БГТУ им. В.Г. Шухова Костюкова ул., д. 46, г. Белгород, Россия, 308012
Тел.: +7-950-718-43-55
Эл. почта: profacorp@gmail.com

Bukhanov D.G., Sulokhin D.V.

Detection of malware based on the classification of source code graphs

This paper contains an analysis of existing approaches to detect the malicious software. An approach to classify the software in computer systems of information processing is offered. Proposed approach consists of three steps: construction of the flow graph of an application's source code, vectorization of the received graph and classification of the graph based on an artificial neural network of adaptive resonance theory. The graph is vectorized based on the bag-of-word model. Obtained results show an application of proposed approach in malware detection field.

Keywords: malware detection, control-flow graph, neural network, data classification.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-30-34

References

1. Sikorski M., Honig A. *Practical Malware Analysis. The Hands – On Guide to Detecting Malicious Software*. San Francisco, No Starch Press Publ., 2012. 766 p.
2. Harchenko S.S., Davydova E.M., Timchenko S.V. Signature analysis of program code. *Polzunovskij vestnik*, 2012, no. 3, pp. 60–64 (In Russ.).
3. Avetisyan A.I., Belevancev A.A., Chuklyaev I.I. Technologies for static and dynamic analysis of software vulnerabilities. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 20–28.
4. Linn C, Debray S. Obfuscation of executable code to improve resistance to static disassembly. *In Proceedings of the 10th ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS'03)*, 2003, pp. 290–299. Available at: <http://www2.cs.arizona.edu/solar/papers/CCS2003.pdf> (accessed: February 18, 2018).
5. Cai H., Shao Z., Vaynberg A. Certified self-modifying code. *In Conf. on Prog. Lang. Design and Implementation (PLDI)*. New York, ACM Press Publ., 2007, pp. 66–77.
6. Cappaert J., Kisserli N., Schellekens D., and Preneel B. Self-encrypting code to protect against analysis and tampering. *1st Benelux Workshop on Information and System Security*, 2006, pp. 14. Available at: <https://www.esat.kuleuven.be/cosic/publications/article811.pdf> (accessed: February 21, 2018).
7. Bonfante G., Kaczmarek M., Marion J. Architecture of a Morphological Malware Detector. *Journal in Computer Virology*, 2009, vol. 5, no. 3, pp. 263–270.

8. Vinod P. Static CFG Analyzer for Metamorphic Malware Code. *Proc. 2nd Int. Conf. Security of Information and Networks*. New York, ACM SIGSAC Publ., 2009, pp. 225–228.

9. Narayanan A., Chandramohan M., Chen L., Liu Y., and Saminathan S. Subgraph2vec: Learning distributed representations of rooted sub-graphs from large graphs. *arXiv:1606.08928*, 2016, Available at: <https://arxiv.org/pdf/1606.08928.pdf> (accessed: February 23, 2018).

10. Kasperski K. Methods of prevention of packers in Linux and BSD operation systems. *System Administrator*, 2006. Available at: https://www.evilfingers.com/publications/research_RU/linux-unpack.pdf (accessed February 27, 2018) (In Russ.).

11. Filiol E. Advanced viral techniques: mathematical and algorithmic aspects. *Journal in Computer Virology*, 2009, vol. 5, no. 4, pp. 263–270.

12. Filiol E. *Computer Viruses: from Theory to Applications*. Verlag Springer-Verlag, 2005. 411 p.

13. Ször P. *The Art of Computer Virus Research and Defense*. Hangerstown Phoenix BookTech, 2005. 744 p.

14. Buhanov D.G., Polyakov V.M., Smakaev A.V. Determination of computer network status based on ART neural networks. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im V.G.Shuhova*, 2017, vol. 1, no 7, pp. 157–162 (In Russ.).

15. Jain L., Lazzerini B., Halici U. *Innovations in ART Neural Networks*. New York, Physica-Verl Heidelberg Publ., 2000, 189 p.

Dmitry G. Buhanov

Graduate student. Software for computer facilities and automated systems, Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov
46, Kostyukov st., Belgorod, Russia, 308012
Phone: +7-904-084-93-66
Email: db.old.stray@gmail.com

Dmitry V. Sulokhin

A fifth-year student. Software for computer facilities and automated systems, Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov
46, Kostyukov st., Belgorod, Russia, 308012
Phone: +7-950-718-43-55
Email: profacorp@gmail.com

УДК 004.89

А.В. Чуйков, А.М. Вульфин, В.И. Васильев

Нейросетевая система преобразования биометрических признаков пользователя в криптографический ключ

Работа посвящена совершенствованию алгоритмов биометрической аутентификации за счет преобразования биометрических признаков в криптографический ключ на основе нейросетевых алгоритмов анализа изображений. Разработан алгоритм нейросетевого преобразования исходных биометрических признаков в криптографический «закрытый» ключ, разработана структура биометрической криптографической системы аутентификации, основанная на использовании нейросетевых алгоритмов, отличающаяся способом формирования и сжатия выделяемых признаков образов с помощью самоорганизующейся двумерной карты Кохонена, свёрточной нейронной сети и вероятностного метода главных компонент. Для однозначного сопоставления пар «биометрический образ» – «криптографический ключ» используются двунаправленная гетероассоциативная память и многослойный персептрон, что позволяет снизить вероятность возникновения ошибки второго рода и достичь оптимальных результатов в процессе генерации криптографического ключа, вследствие чего отсутствует осуществляемая возможность компрометации конфиденциальных данных в процессе аутентификации.

Ключевые слова: биометрическая аутентификация, самоорганизующаяся двумерная карта Кохонена, свёрточные нейронные сети, многослойный персептрон, вероятностный метод главных компонент, AlexNET, двунаправленная гетеро-ассоциативная память.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-35-41

На сегодняшний день существуют два основных направления применения биометрических методов: решение задачи аутентификации пользователя и их интеграция с криптографическими системами [1–3].

Один из основных недостатков криптографических систем заключается в необходимости обеспечения надежного хранения секретных криптографических ключей.

Перспективным направлением повышения эффективности систем аутентификации является интеграция биометрических и криптографических методов. Биометрические методы в криптографических системах первоначально применялись для защиты от несанкционированного доступа злоумышленника к секретным ключам. На сегодняшний день их основным применением стало преобразование биометрических параметров в код ключа доступа (криптографический ключ) [3].

Исходные биометрические признаки пользователя нечетко воспроизводимы, что затрудняет их использование в биометрических криптографических преобразованиях, требующих точного значения ключа [1, 3].

Биометрические системы аутентификации на основе применения технологий искусственного интеллекта чаще всего аппроксимируют нелинейное функциональное отображение, позволяют отнести распознаваемый биометрический образ к одному из заранее заданных классов. Такие системы подвержены атаке на «последний бит» [4]. Системы биометрической аутентификации на основе наиболее распространённого инструмента искусственного интеллекта (нейросетевых технологий) также имеют ряд недостатков:

1) необходимость переобучения нейронной сети при добавлении пользователя, что может быть решено с помощью модульной структуры системы;

2) данные системы подвержены ошибке второго рода, которая выражается в вероятности допущения в систему нелегитимного пользователя.

Следовательно, необходимо совершенствовать биометрические системы аутентификации за счет создания комплексных систем, учитывающих несколько источников биометрических образов, и использовать методы, например искусственного интеллекта, для однозначного сопоставления пары «биометрический образ» – «криптографический ключ».

Цели и задачи

Целью работы является совершенствование алгоритмов биометрической аутентификации за счет нейросетевого преобразования биометрических признаков в криптографический ключ.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1) анализ существующих биометрических криптографических систем;

2) разработка структуры системы аутентификации с нейросетевым преобразованием исходных биометрических признаков в криптографический закрытый ключ;

3) реализация алгоритма нейросетевого преобразования исходных биометрических признаков в криптографический закрытый ключ;

4) разработка программного модуля, реализующего предложенный алгоритм биометрической аутентификации, и оценка эффективности предложенного решения на натуральных данных.

Анализ существующих криптографических биометрических систем

Сравнительная характеристика существующих решений представлена в табл. 1 [1–6].

В [1–3] отмечается, что во многих исследованиях длина используемых криптографических ключей очень мала, а вероятность ошибки второго рода пре-

вышает допустимые нормы для практического применения.

Для генерации ключей на основе биометрических образов сегодня используются два основных инструмента, удовлетворяющих требованиям современной криптографии и обладающих низкой вероятностью ошибки второго рода: нейросетевой преобразователь «биометрия – код» и нечеткие экстракторы.

Нейросетевой преобразователь «биометрия–код» [4, 5] основан на использовании нейронной сети с небольшим количеством скрытых слоев или вовсе без них. Размерность пространства признаков и выходного вектора сети, напротив, велико, что позволяет реализовать преобразование нечеткого входного вектора биометрических признаков «свой» в соответствующий криптографический ключ, а иной случайный входной вектор (образ «чужой») – в случайный выходной образ [1].

Таблица 1

Сравнительный анализ существующих криптографических биометрических систем

	С освобождением ключа «key release cryptosystems»	Со связыванием ключа «key binding cryptosystems»	С генерацией ключа «key generation cryptosystems»
Особенности	Биометрический эталон и ключ хранятся отдельно;	Криптографический ключ и биометрический эталон связаны с помощью алгоритма замещения небольшого количества секретных битов криптографическим ключом; используются корректирующие коды; нечеткий контейнер (fuzzy vault) – наиболее распространенная схема	Криптографический ключ извлекается из биометрических данных и для него не требуется хранения в базе данных; большие искусственные нейронные сети; нечеткие экстракторы (fuzzy extractors)
Достоинства	Простота реализации	Безопасность метода обусловлена секретностью алгоритмов закрытия и восстановления ключа	Криптографический ключ не хранится в базе данных
Недостатки	Биометрические эталоны хранятся локально; требуется доступ к хранящимся локально незащищенным и незашифрованным биометрическим эталонам;	Детерминированные алгоритмы закрытия ключа могут быть скомпрометированы; алгоритмы сложны в реализации из-за изменчивости биометрических признаков	Высокая сложность реализации системы; биометрические данные неточно воспроизводимы, что затрудняет их использование в качестве основы устойчивой генерации ключа
Уязвимости и атаки	Подмена злоумышленником с помощью вредоносного ПО модуля сравнения образов	Корреляционная атака (correlation attacks, attacks via record multiplicity – ARM); атака с инверсией ключа (surreptitious key-inversion attacks – SKI); атака подстановки со смешиванием (blended substitution attacks)	

Нечеткие экстракторы (fuzzy extractors) [2, 3, 6] позволяют однозначно восстанавливать секретный ключ из нечеткого биометрического образа за счет использования дополнительной информации [7, 8] (helper data). В основе работы нечеткого экстрактора лежит возможность извлечения случайной равномерно распределенной последовательности из биометрического образа и последующее корректное восстановление ее из размытого биометрического образа.

Одной из актуальных проблем создания криптографических биометрических систем аутентификации является проблема их тестирования. Требуется создание баз биометрических образов (двухмерных и трехмерных изображений лица и т.д.) значительной размерности, что сопряжено с определенными трудностями. Использование изображения лица человека для формирования биометрического образа имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами: для этого не требуется специальное оборудование и не нужен физический контакт с устройством.

Разработка структуры и алгоритма функционирования системы аутентификации с нейросетевым преобразованием исходных биометрических признаков в криптографический закрытый ключ

Предлагаемая структура нейросетевой системы (НС) биометрической аутентификации приведена на рис. 1.

При разработке структуры системы аутентификации с нейросетевым преобразованием исходных биометрических признаков в криптографический закрытый ключ алгоритм разделен на пять условных этапов:

- 1) предобработка признаков;
- 2) генерация признаков;
- 3) создание базы биометрических образов;
- 4) нейросетевое сопоставление образов и ключей;
- 5) восстановление ключа.

Задача блока предобработки признаков заключается в унификации изображения лица человека и построении первичного вектора признаков.

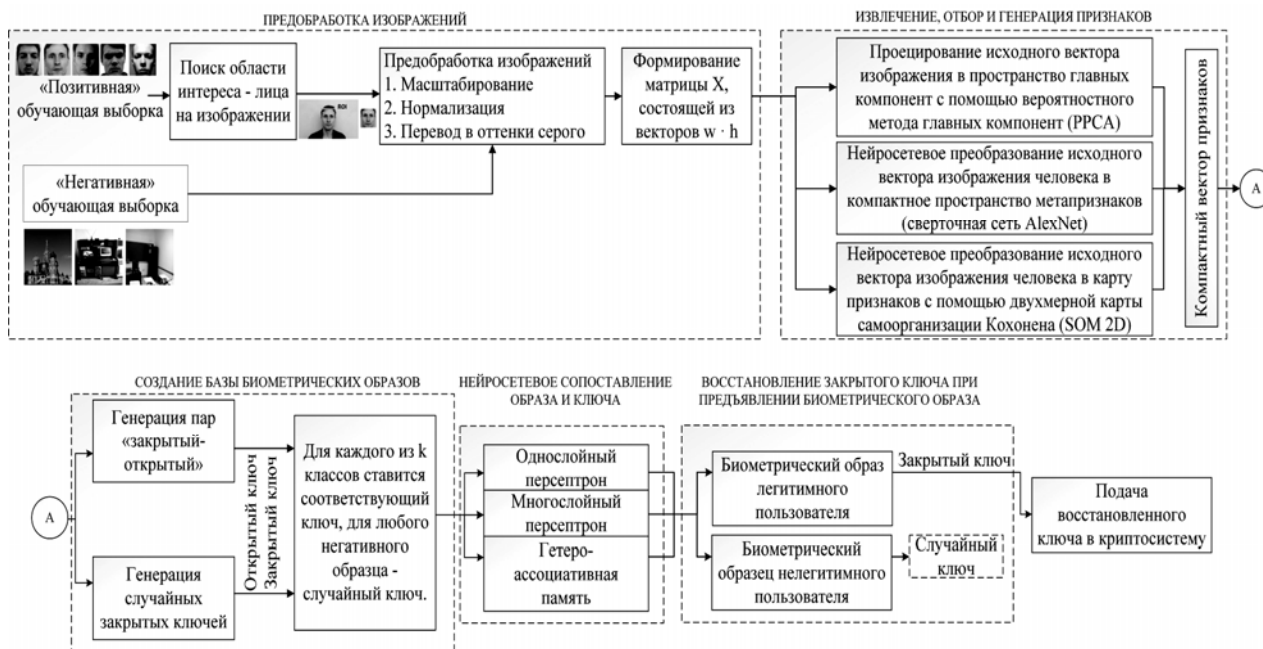


Рис. 1. Структура нейросетевой системы биометрической идентификации

Далее векторы признаков подаются в блок генерации признаков, где происходит их преобразование в компактные векторы признаков, содержащие минимальный и достаточный объем информации.

Если текущей является задача добавления пользователя в систему, то компактный вектор признаков подается на вход блока создания базы биометрических образов, где выполняется нейросетевое сопоставление закрытого ключа и подаваемого вектора.

Блок восстановления ключа необходим для трансформации компактного вектора признаков в требуемый ключ пользователя (при несанкционированной авторизации система выдает случайный ключ, неиспользуемый в системе).

Экспериментальная часть

На этапе предобработки осуществляется создание двух обучающих выборок: позитивной и негативной. В видеопотоке зафиксированы разные углы наклона головы в меняющихся условиях освещения, а также с однородным фоном. Исходные кадры имели разрешение 1280×720 пикселей, затем на каждом из них произведен поиск области, содержащей лицо человека (ROI – region of interest), с помощью алгоритма Виолы–Джонса [9]. Выделенные области размечены и масштабированы до размера 256×256 пикселей таким образом, чтобы содержать минимальное количество пикселей за пределами интересующего нас лица. Дополнительно производилась нормализация изображений выравниванием гистограммы для нормализации участков кадров с различными яркостями.

Первая выборка содержит достаточное количество изображений лиц каждого пользователя системы. Негативная выборка образована изображениями произвольных предметов, пейзажей и т.п. и служит для изоляции позитивных примеров в пространстве признаков.

Кодирование признаков предлагается выполнять с помощью следующей схемы: изображения всех классов позитивной и негативной выборок представляются в виде целочисленной матрицы унифицированного размера $[n, n]$, разбиваемой построчно в вектор-столбец размером $[n \times n, 1]$, что обеспечивает инвариант к смещению области интереса в вертикальном направлении. Каждый элемент вектор-столбца может быть преобразован в рефлексивный двоичный 8-разрядный код Грея [10], в таком представлении два соседних значения цветовой шкалы отличаются только в одном разряде [11]. Открытые и закрытые ключи созданы в криптографической системе с использованием асимметричного алгоритма RSA. Закрытый ключ представляется в виде целочисленного вектор-столбца $[m, 1]$ длиной $m = 132$. Каждый элемент вектора преобразуется в рефлексивный двоичный 8-разрядный код Грея, а затем полученная матрица снова делится на строки. Из полученных строк строится вектор-столбец $[8 \times m, 1]$.

Генерация признаков заключается в проецировании первичного вектора в новое пространство признаков и формировании компактного вектора признаков каждого образа для последующей нейросетевой обработки. Этот вектор подается в нейросетевой блок в форме двоичного вектора или в форме целочисленного вектора, который, в свою очередь, генерирует закрытый ключ, подаваемый на вход модуля криптографической системы.

Для генерации признаков предлагается использовать следующие подходы:

- 1) самоорганизующаяся двумерная карта Кохонена (self-organizing map, SOM) [12];
- 2) вероятностный метод главных компонент (ВМГК, probabilistic principal component analysis, PPCA) [13];
- 3) сверточная нейронная сеть (convolutional neural network, CNN) AlexNet [14].

Сопоставление компактных векторов биометрических образов и криптографических ключей реализовано с помощью следующих методов:

1) построение и обучение двунаправленной ассоциативной памяти на основе нейронной сети Б. Коско в варианте Й. Ванга (ВАМ) [15];

2) построение и обучение однослойных и многослойных нейронных сетей прямого распространения на основе персептронов (МСП).

Параметры проведения экспериментов приведены в табл. 2, где

1) исходное изображение – в градациях серого или в RGB в виде целочисленной матрицы;

2) satlins – кусочно-линейная функция активации, симметричная [16];

3) elliotstg – аппроксимация сигмоидальной функции активации вида гиперболический тангенс [17];

4) hardlim – пороговая функция активации, не симметричная.

Таблица 2

Сравнительные архитектуры НС-блока и условия эксперимента

Параметры	Эксперимент				
	1	2	3	4	5
	МСП	ВМГК + МСП	Двумерная карта Кохонена + МСП	AlexNET + МСП	ВАМ
Исходные изображения	[64, 64, 1]	[64, 64, 1]	[64, 64, 1]	[227, 227, 3] в цветовой схеме RGB	[64, 64, 1]
Генерация компактного вектора признаков	Нет	С помощью ВМГК отобрано 64 главных компоненты	Двумерная карта Кохонена, 15×15 нейронов с гексагональной решеткой	Сверточная НС AlexNET (активации fc8 слоя)	Нет
Архитектура НС блока сопоставления					
Размерность входного вектора	4096	64	225	1000	4096
Тип входного вектора	Десятичные целые числа [0, 255]	Вещественные числа	Бинарный вектор активностей нейронов выходного слоя карты Кохонена	Вещественные числа	Двоичный код Грея
Размерность выходного вектора	132 или 1056	1056	1056	1056	1056
Тип выходного вектора	Десятичные целые числа [0, 255] или двоичные в коде Грея	Двоичный код Грея	Двоичный код Грея	Двоичный код Грея	Двоичный код Грея
Тип НС	МСП	МСП	МСП	МСП	ВАМ
Количество нейронов по слоям	4096, 2018, 1056	64, 1056	225, 1056	1000, 1056	4096, 1056
Функции активации нейронов по слоям	Elliotstg, elliotstg, satlins	Elliotstg, satlins	Elliotstg, satlins	Elliotstg, satlins	Satlins, satlins
Постобработка выхода НС	Нет / hardlim	Hardlim	Hardlim	Hardlim	Hardlim

Таблица 3

Сравнительные результаты экспериментов

Параметры	Обучение					Тестирование				
	МСП	ВМГК + МСП	Двумерная карта Кохонена + МСП	AlexNET + МСП	ВАМ	МСП	ВМГК + МСП	Двумерная карта Кохонена + МСП	AlexNET + МСП	ВАМ
Абсолютное количество ошибок / примеров	394 [4500]	362 [4500]	281 [4500]	273 [4500]	23 [450]	133 [1500]	124 [1500]	95 [1500]	88 [1500]	8 [150]
Доля корректно распознанных образов, %	91,24	91,96	93,76	93,93	94,89	91,13	91,73	93,67	94,13	94,67
Чувствительность	0,9688	0,9825	0,9784	0,9729	0,9865	0,9828	0,9806	0,9808	0,9808	1
Специфичность	0,9727	0,9753	0,9830	0,9811	0,9628	0,9763	0,9775	0,9774	0,9774	0,9758
Положительная прогностическая значимость	0,8794	0,8869	0,9188	0,9101	0,8391	0,8837	0,9004	0,9011	0,9014	0,8966
Прогностическая ценность отрицательных результатов	0,9934	0,9965	0,9957	0,9946	0,9972	0,9968	0,9959	0,9959	0,9959	1

Стоит отметить, что во всех экспериментах, кроме эксперимента с ВАР, обучающие выборки состояли из позитивной (5 классов по 1000 примеров) и негативной (1000 примеров). В случае с ВАР обучающая выборка состояла из позитивной (5 классов по 100 примеров) и негативной (100 примеров). Разделение всех выборок в процентном соотношении было следующим: обучающая выборка составляла 75%, а тестовая – 25%.

В ходе экспериментов, результаты которых отражены в табл. 3, было установлено преимущество карт Кохонена в показателях ошибки первого рода, но в свою очередь данный метод связан с проблемами долгого обучения и повышенной сложности добавления пользователей, чего лишен метод главных компонент.

Свёрточные сети требуют существенных вычислительных ресурсов для выделения метапризнаков и позволяют получить лучшие показатели чувствительности и специфичности.

Использование гетероассоциативной памяти на основе нейронной сети ВАР показало хорошие результаты сопоставления, однако емкость подобной сети очень мала.

Для сопоставления компактного вектора признаков, выделенных из биометрического образа, и закрытого криптографического ключа использованы многослойные персептроны и гетероассоциативная память на основе нейронной сети ВАР.

Количество изменяемых параметров очень велико и не позволяет сопоставлять большое количество входных образов высокой размерности (n) и выходных ключей (p) достаточной длины. Общее количество запоминаемых сетью образов выражается соотношением $m = \sqrt{\min(n, p)}$.

Установлено, что достаточно одного скрытого слоя для успешного отображения входного образа в выходной ключ. Использование примеров проверочной выборки, не вошедших в обучающую и тестовую (порядка 30 тыс. изображений лиц и негативных примеров), показало возможность сети генерировать ключ, не принадлежащий ни одному из легитимных пользователей. При использовании только позитивной выборки 42% примеров класса «чужой» нейронная сеть относит к одному из имеющихся классов – порождает ключ легитимного пользователя.

Предположительно такое поведение обусловлено особенностью расположения порождаемых персептронами разделяющих гиперплоскостей и построения незамкнутых областей расположения выходных образов.

Заключение

В работе предложен подход на основе интеграции биометрической системы и криптографического модуля, что обеспечивает распределенное хранение базы биометрических образов и позволяет использовать в качестве выхода нейронной сети генерируемый на основе образа секретный криптографический ключ.

Для достижения поставленной цели разработана структура системы биометрической аутентифи-

кации, которая выделяет биометрические признаки двухмерного изображения лица из видеопоследовательности путем применения алгоритмов цифровой обработки изображений, отличающейся способом формирования и сжатия выделяемых первичных признаков биометрических образов с помощью самоорганизующейся карты Кохонена, вероятностного алгоритма главных компонент, двунаправленной гетероассоциативной памяти и многослойной нейронной сети, что позволяет порождать уникальные приватные ключи для легитимных пользователей в процессе аутентификации без возможности компрометации сжатого устойчивого вектора биометрических признаков, поскольку весь процесс проходит в нейросетевом базисе, представляющем собой «черный ящик».

В результате сравнительного анализа алгоритмов извлечения первичных биометрических признаков и сопоставления сформированного образа с закрытым ключом в рамках предложенной системы аутентификации установлено, что наиболее эффективным на тестовых данных является подход с использованием глубоких свёрточных сетей и нейросетевой двунаправленной гетероассоциативной памяти.

Литература

1. Васильев В.И. Интеллектуальные системы защиты информации: учеб. пособие / В.И. Васильев. – 2-е. изд. – М.: Машиностроение, 2012. – 199 с.
2. Куликова О.В. Биометрические криптографические системы и их применение // Безопасность информационных технологий. – 2009. – Т. 16, № 3. – С. 53–58.
3. Сидоркина И.Г., Меркушев О.Ю. Использование биометрической криптографии в системе управления доступом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-biometricheskoy-kriptografii-v-sisteme-upravleniya-dostupom>, свободный (дата обращения: 12.03.2018).
4. Иванов А., Малыгин А. Высоконадежная биометрическая аутентификация пользователя: последний дюйм первой мили // Первая миля. – 2007. – Т. 2, № 2. – С. 20–24.
5. Ахметов Б.С. Технология использования больших нейронных сетей для преобразования нечетких биометрических данных в код ключа доступа / Б.С. Ахметов, А.И. Иванов, В.А. Фунтиков и др. // Алматы: ТОО «Изд-во LEM», 2014. – 144 с.
6. Dodis Y., Ostrovsky R., Reyzin L. et al. Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy Data // Siam Journal on Computing – 2006. – Vol. 38, № 1. – P. 97–139.
7. Riaz N., Riaz A., Khan S.A. Biometric template security: an overview // Sensor Review. – 2018. – Vol. 38, № 1. – P. 120–127.
8. Biometrics-based Key Generation Research: Accomplishments and Challenges [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kism.or.kr/file/memoir/6_2_2.pdf, свободный (дата обращения: 20.08.2018).
9. Чуйков А.В., Вульфин А.М. Система распознавания жестов на основе нейросетевых технологий // Вестник УГАТУ. – 2017. – Т. 21, № 3. – С. 113–122.
10. Код Грея [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Код_Грея, свободный (дата обращения: 12.03.2018).

11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – Т. 1072. – С. 2.

12. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с пол. И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

13. Байесовский метод главных компонент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/7/73/BMMO11_11.pdf, свободный (дата обращения: 12.03.2018).

14. Сверточная нейронная сеть. – Ч. 1: Структура, топология, функции активации и обучающее множество [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/348000/>, свободный (дата обращения: 12.03.2018).

15. Kosko B. Bidirectional associative memories // IEEE Transactions on Systems, man, and Cybernetics. – 1988. – Т. 18, № 1. – Р. 49–60.

16. Функции активации в нейронных сетях. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aiportal.ru/articles/neural-networks/activation-function.html>, свободный (дата обращения: 12.03.2018).

17. Elliot symmetric sigmoid transfer function [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/elliotsig.html>, свободный (дата обращения: 12.03.2018).

Чуйков Артём Валерьевич

Студент каф. вычислительной техники и защиты информации (ВТиЗИ) Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ) К. Маркса ул., д. 12, г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 450008
Тел.: +7-927-351-99-53
Эл. почта: artem.guy@gmail.com

Вульфин Алексей Михайлович

Канд. техн. наук, доцент каф. ВТиЗИ УГАТУ К. Маркса ул., д. 12, г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 450008
Тел.: +7-917-400-21-89
Эл. почта: vulfin.alexey@yandex.ru

Васильев Владимир Иванович

Д-р техн. наук, профессор каф. ВТиЗИ УГАТУ К. Маркса ул., д. 12, г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 450008
Тел.: +7-917-350-11-39
Эл. почта: vasilyev@ugatu.ac.ru

Chuikov A.V., Vulfin A.M., Vasilyev V.I.

Neural network system for converting the user biometric characteristics into a cryptographic key

The goal of this work is to improve the algorithms of biometric authentication by converting biometric features into a cryptographic key based on neural network technologies. To achieve this goal, an algorithm for the neural network transformation of the original biometric features into a cryptographic «private» key has been developed. The structure of the biometric cryptographic authentication system has also been developed, this structure is based on the use of neural network algorithms, distinguished by the method of forming and compressing the selected features using a self-organizing two-dimensional Kohonen map, a convolutional neural network and the probabilistic method of principal components. To unambiguously match pairs of «biometric image» – «crypto-

graphic key», bidirectional hetero-associative memory and a multilayer perceptron are used, that reduces the probability of a false negatives error and allows to achieve optimal results in the process of cryptographic key generation. As a result, there is no feasible possibility of compromising confidential data in the authentication process.

Keywords: biometric authentication, PPCA, SOM, MLP, CNN, BAM, AlexNet.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-35-41

References

- Vasilyev V. I. *Intellektual'nye informacionnye sistemy: uchebnoe posobie* [Intelligent protection of information systems]. Moskva: Mashinostroyeniye, 2012. 199 p.
- Kulikova O. V. Biometricheskiye kriptograficheskiye sistemy i ikh primeneniye. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy*, 2009, vol. 16, no. 3, pp. 53–58.
- Sidorkina I.G., Merkushev O.Yu. Use of biometric cryptography in a control system of access. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-biometricheskoy-kriptografii-v-sisteme-upravleniya-dostupom> (accessed: March 12, 2018).
- Ivanov A., Malygin A. Vysokonadezhnaya biometricheskaya autentifikatsiya polzovatelya: posledniy dyuym pervoy mili. *Pervaya milya*, 2007, vol. 2, no. 2, pp. 20–24.
- Akhmetov B.S., Ivanov A.I., Funtikov V.A. et al. Tekhnologiya ispol'zovaniya bol'shikh neyronnykh setey dlya preobrazovaniya nechetkikh biometricheskikh dannykh v kod klyucha dostupa: monogr. [Application of large neural networks for fuzzy biometric data conversion into access key code: monograph]. Kazakhstan, Almaty: Izd-vo LEM, 2014, 144 p.
- Dodis Y., Ostrovsky R., Reyzin L., et al. Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy Data. *Siam Journal on Computing*, 2006, vol. 38, no. 1, pp. 97–139.
- Riaz N., Riaz A., Khan S.A. Biometric template security: an overview. *Sensor Review*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 120–127.
- Biometrics-based Key Generation Research: Accomplishments and Challenges. Available at: http://kism.or.kr/file/memoir/6_2_2.pdf (accessed: August 20, 2018).
- Chuykov A., Vulfin A. Gesture recognition system // *Vestnik UGATU*, 2017, vol. 21, no. 3, pp. 113–122. (In Russ.).
- Gray Code. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Код_Грея (accessed: March 12, 2018).
- Gonzalez R., Woods R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing]. Moskva: Tehnosfera, 2005, 1104 p.
- Osovskiy S. *Neyronnyye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing]. Moskva: Finansy i statistika, 2004, 344 p.
- Bayesovskiy metod glavnykh komponent. Available at: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/7/73/BMMO11_11.pdf (accessed: March 12, 2018).
- Svertochnaya neyronnaya set', chast' 1: struktura, topologiya, funktsii aktivatsii i obuchayushcheye mnozhestvo. Available at: <https://habrahabr.ru/post/348000/> (accessed: March 12, 2018).
- Kosko B. Bidirectional associative memories. *IEEE Transactions on Systems, man, and Cybernetics*, 1988, vol. 18, no. 1, pp. 49–60.
- Funktsii aktivatsii v neyronnykh setyakh. Available at: <http://www.aiportal.ru/articles/neural-networks/activation-function.html> (accessed: March 12, 2018).
- Elliot symmetric sigmoid transfer function. Available at: <https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/elliotsig.html> (accessed: March 12, 2018).

Artem V. Chuykov

Student, Department of Computing Equipment and Information Protection, Ufa State Aviation Technical University
12, Karl Marx st., Ufa, The Republic of Bashkortostan,
Russia, 450008

Phone: +7-927-351-99-53

Email: artem.guy@gmail.com

Alexey M. Vulfin

Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Department of Computing Equipment and Information
Protection, Ufa State Aviation Technical University
12, Karl Marx st., Ufa, The Republic of Bashkortostan,
Russia, 450008

Phone: +7-917-400-21-89

Email: vulfin.alexey@yandex.ru

Vladimir I. Vasilyev

Doctor of Engineering Sciences, professor, Department
of Computing Equipment and Information Protection,
Ufa State Aviation Technical University
12, Karl Marx st., Ufa, The Republic of Bashkortostan,
Russia, 450008

Phone: +7-917-350-11-39

Email: vasilyev@ugatu.ac.ru

УДК 519.688

В.В. Чемерилов, А.С. Фадеев

Система автоматического разрешения омографии на основе семантической связи слов смежных предложений в текстовом отрывке

Описана методика автоматического разрешения омографии в вопросительных предложениях на основе смысловой связи с ответом. Данная методика впервые рассматривает семантические связи слов за пределами одного предложения при разрешении омографии. В качестве входных данных использовались результаты анализа семантических классов слов семантико-синтаксического анализатора Semsin. На основе данной методики был разработан программный алгоритм, позволяющий автоматически маркировать омографы SSML-тегом, который меняет акустические характеристики синтезированной речи. На специальной тестовой выборке, состоящей из сверхфразовых единств, был проведен эксперимент по оценке качества работы алгоритма, давший положительные результаты. В ходе работы также были выявлены недочеты, которые связаны с ошибками анализа семантических классов слов семантико-синтаксического анализатора Semsin и невозможностью распознавания контекста в пределах одного предложения.

Ключевые слова: семантическая связь предложений, синтез русской речи по тексту, разрешение омографии, омографы, вопросительное предложение, сверхфразовое единство, анализатор Semsin.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-42-48

Одной из важнейших задач, связанных с улучшением качества искусственной русской речи, является разрешение омографии [1]. Омографы [2] – это слова, которые совпадают в написании, но различаются в произношении, к примеру: кирка (церковное) – кирка́ (инструмент), порты (мн.ч. порт) – порты́ (штаны) и т.д.

В силу того, что компьютер рассматривает слово как набор символов и не может четко определить его семантику, автоматизация обработки омографов вызывает существенную сложность, однако имеется несколько методов разрешения неоднозначности в омографах.

В иностранных языках явление омографии не связано с изменением ударного слога в словах, а рассматривает слова одинакового написания с одинаковым ударным слогом, но различным произношением. Кроме того, явление омографии рассматривают наравне с омонимией, когда произношение слов одинаковое, но смысл разный [3], например: сáп (мочь) – сáп (бидон), báт (летучая мышь) – báт (ракетка), léттер (письмо) – léттер (точность). В русском языке понятия омонимии и омографии, как правило, имеют четкое разделение [4].

Большинство методик разрешения омографии (как и омонимии) в английском языке базируется на формализованной структуре предложения, где каждая часть речи занимает определенное положение [5]. Описанные методики не рассматривают семантические связи за пределами одного предложения.

Высокая формализация структуры английского языка позволяет активно применять методы машинного обучения для решения задач омографии и омонимии [6].

Один из первых методов разрешения омографии, применяемых в системах автоматизированного синтеза русской речи, заключался в использовании словарей, содержащих устойчивые выражения с

омографом [7], например: кукурузная мука́, со́рок разбойников, строительные леса. Однако качество работы такого метода полностью зависело от размера словаря. В силу сложности составления словаря, который мог охватить все богатство русского языка и рассмотреть все возможные случаи омографии, данный метод только частично решал поставленную задачу.

В связи с появлением синтаксических анализаторов текста, Б.М. Лобановым была проведена серия исследований по разрешению омографии на основе синтаксического и морфологического анализа предложения. Предложенный метод заключался в поиске статических закономерностей между результатами синтаксического и морфологического анализа текстовых отрывков синтаксическим анализатором ЭТАП-3 и проявлением «Ё»-омографов в различных текстах [1]. Метод не решал поставленную задачу в полной мере, так как требовал большого количества дополнительной информации, получаемой на основе морфологического, синтаксического, семантического и прагматического анализа текстов.

В 2013 г. научными сотрудниками Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий был разработан новый метод снятия омографии [8]. В его основе лежит анализ контекста предложения. В предложении с омографом проводится поиск ключевых слов или выражений. Сначала обрабатываются слова, стоящие в непосредственной близости с омографом, затем анализируется состав предложения целиком. Далее проводится исследование грамматического окружения на уровне классов словоформ. Были введены специальные грамматические правила для формализации данного принципа. Они увеличивают условный «вес» словоформы в зависимости от ее окружения. На основе данного метода был разработан алгоритм и проведена его оценка. В 95% слу-

чаев система успешно разрешила омографию. Основными источниками ошибок стали сложные случаи, для решения которых требовался анализ дистанционных синтаксических связей.

Несмотря на то, что последний метод довольно успешно разрешает омографическую неопределенность, анализ данных в нем (как и в остальных методах) проводится только в пределах одного предложения. Однако существуют случаи, когда предложение содержит недостаточно информации для исследования, т.е. в нем отсутствуют ключевые слова и выражения, например:

Что такое замок?

В приведенном примере анализ ближайшего окружения омографа в рамках одного предложения не даст достаточно данных для того, чтобы разрешить неоднозначность, так как невозможно определить семантику вопроса. Однако можно установить значение омографа, исследуя текстовый отрывок, представляющий собой сверхфразовое единство. Сверхфразовое единство (СЕ) – отрезок текста в форме последовательности двух и более предложений, которые группируются в смысловые блоки на основе структурных связей. В данной работе используется минимальное СЕ, состоящее из двух предложений – вопроса и ответа [9, 10]. Например:

Что такое замок? Крепость.

При сопоставлении слова смежного предложения «Крепость» с омографом «замок» разрешается неоднозначность, что дает возможность установить ударный слог в омографе (первый).

Для разрешения неоднозначности в омографах на основе данных смежного предложения необходимо определить семантическую связь между омографом и словом смежного предложения внутри СЕ [11].

Методика автоматического разрешения омографии на основе семантической связи слов смежных предложений

Пару предложений можно представить в виде двух множеств:

$$P_1 = \{C_{П11}, C_{П12} \dots C_{П1n}\},$$

$$P_2 = \{C_{П21}, C_{П22} \dots C_{П2n}\},$$

где P_1 – множество слов первого предложения; P_2 – множество слов второго предложения. P_1 и P_2 обрабатываются семантическим анализатором текста, который представляет выходные данные в виде списка слов и их семантических характеристик на основе данных семантических словарей – семантического класса S слова C , представленного в виде множества. Каждый элемент множества S определяет значение слова на определенном уровне иерархии:

$$S_c = \{V_{1c}, V_{2c} \dots V_{nc}\}.$$

Например, множество значений слова «самовар» представлено в следующем виде:

$$S_c = \{\text{физический объект, вещь, утварь, инвентарь, кухонный}\}.$$

Некоторые слова в русском языке – омографы и омонимы [1] – могут иметь несколько семантиче-

ских классов, например, для омонима «коса» представлен следующий набор семантических классов:

$$S_{c1} = \{\text{жизнь, части живого, голова, волосы}\};$$

$$S_{c2} = \{\text{физический объект, вещь, утварь, инвентарь, сельскохозяйственный}\};$$

$$S_{c3} = \{\text{природа, природные зоны, ландшафт, берег}\}.$$

А для омографа «замок» представлены следующие семантические классы:

$$S_{c1} = \{\text{физический объект, вещь, утварь, инструменты}\};$$

$$S_{c2} = \{\text{физический объект, поселения, постройка, жилье, дом}\}.$$

Для определения семантической связи между омографом и ключевым словом смежного предложения (ключевым относительно исследуемого омографа) проводится поиск ключевого слова во втором предложении. В данной работе рассматриваются три модели предложений, которые легко поддаются формализации и машинной автоматизированной обработке:

1. Предложение содержит только одно слово – ключевое (КС).

$$P_2 = \{\text{КС}\}.$$

Например (предлоги не учитываются):

Где гвоздики? У молотка.

$$P_1 = \{\text{где, гвоздики}\}, P_2 = \{\text{у, молотка}\},$$

$$\text{КС} = \{\text{«молотка»}\}.$$

2. Предложение содержит только два слова: вспомогательное (ВС) и ключевое.

$$P_2 = \{\text{ВС, КС}\}.$$

Вспомогательное слово представляет собой согласие или отрицание. Например:

Он купил муку? Нет, пшено.

$$(\text{КС} = \{\text{«пшено»}\}).$$

3. Предложение, в котором присутствует уточняющее слово (УС):

$$P_2 = \{C_{П21}, C_{П22}, \text{УС}, \text{КС}, \dots C_{П2n}\}.$$

Уточняющее слово выражается наречиями «точно», «конечно», «только» и т.д. Оно будет стоять перед ключевым словом, так как собеседник делает акцент именно на этом слове. Пример:

Где купить гвоздики? Их можно купить только в цветочном магазине.

$$(\text{КС} = \{\text{«цветочном»}\}).$$

Для определения семантической близости между омографом и ключевым словом смежного предложения необходимо сопоставить семантические классы омографа с семантическим классом ключевого слова смежного предложения. Для числового представления семантической близости омографа и ключевого слова смежного предложения был введен коэффициент g_{oi} , который определяется по следующей формуле:

$$g_{oi} = \frac{|S_{oi} \cap S_{kc}|}{\max(|S_{oi}|, |S_{kc}|)}, \quad (1)$$

где g_{oi} – весовой коэффициент семантической близости омографа, который имеет порядковый номер i , и

ключевого слова смежного предложения; S_{oi} – семантический класс омографа с порядковым номером i ; S_{kc} – семантический класс ключевого слова смежного предложения. Пересечение множеств S_{oi} и S_{kc} позволяет выделить те значения омографа и ключевого слова смежного предложения, которые совпали. Выбор множества с наибольшей мощностью позволяет исключить ситуацию, в которой один из исследуемых семантических классов содержит недостаточно значений слова. Например, множеству слов СЕ «Где гвоздики? У молотка», соответствуют следующие семантические классы (предлоги, частицы и союзы опускаются, так как они не имеют семантических классов):

Для слова C_{11} = «гвоздики»:

$S_{o1} = \{ \text{физический объект, вещь, утварь, детали} \};$

$S_{o2} = \{ \text{жизнь, пища, блюда, соусы} \};$

$S_{o3} = \{ \text{природа, растения, цветы} \}.$

Для ключевого слова смежного предложения «молотка»:

$S_{kc} = \{ \text{физический объект, вещь, утварь, инструменты, для ремонта и строительства} \}.$

При сопоставлении элементов семантических классов омографа и ключевого слова смежного предложения рассчитываются коэффициенты семантической близости:

$$g_{o1} = 0,6, \quad g_{o2} = 0, \quad g_{o3} = 0.$$

Наиболее семантически близкое к ключевому слову смежного предложения значение омографа будет иметь наибольшее значение коэффициента семантической близости. В рассматриваемом примере максимальный весовой коэффициент имеет порядковый номер 1.

$$\max(g_{oi}) = g_{o1} = 0,6.$$

Если между омографом и ключевым словом смежного предложения существует семантическая связь, то значение омографа определяется семантическим классом с максимальным коэффициентом семантической близости $\max(g_{oi})$. В рассматриваемом примере тип семантической связи определяется как «физический объект, вещь, утварь». Эта связь была установлена между словами «гвоздики» и «молотка», значение омографа определяется как

$S_{o1} = \{ \text{физический объект, вещь, утварь, детали} \}.$

Определив семантический класс омографа, можно установить ударный слог в этом слове. В рассмотренном примере ударение в омографе падает на первый слог (гвоздики). Для исключения семантически слабосвязанных слов, между которыми не наблюдается семантической связи (т.е. ключевое слово смежного предложения никак не связано с рассматриваемым омографом), был введен коэффициент значимости p , который оценивает наличие семантической связи между словами. Например, слова «леса» и «Артем» имеют следующие семантические классы:

Для омографа «леса»:

$S_{o1} = \{ \text{физический объект, материалы, строительные} \};$

$S_{o2} = \{ \text{природа, природные зоны, ландшафт, лес} \}.$

Для слова «Артем»:

$S_c = \{ \text{физический объект, живой человек, личность, ФИО, имя} \}.$

Несмотря на то, что у данных слов совпадают первые элементы семантических классов, S_{o1} и S_c , они не связаны по смыслу. Коэффициент значимости рассчитывается эмпирическим путем. Если $\max(g_{oi}) \geq p$, то верный в данном контексте семантический класс омографа определяется как семантический класс, порядковый номер которого совпадает с порядковым номером максимального коэффициента семантической близости g_{oi} . Если $\max(g_{oi}) < p$, то семантическая связь между омографом и ключевым словом смежного предложения отсутствует.

Система автоматического разрешения омографии на основе семантической связи слов смежных предложений

Для реализации описанной методики была разработана система автоматического разрешения омографии на основе семантической связи слов смежных предложений. Функциональная схема системы приведена на рис. 1.

На вход системы подается пара предложений. С помощью блока разбиения текста на предложения они разбиваются на два предложения. Каждое предложение преобразуется в список слов. Список слов предложения, содержащего омограф (Π_1), передается блоку выделения омографа, который на основе словаря омографов [12] выделяет во множестве слов Π_1 омограф. Выделенный омограф передается блоку

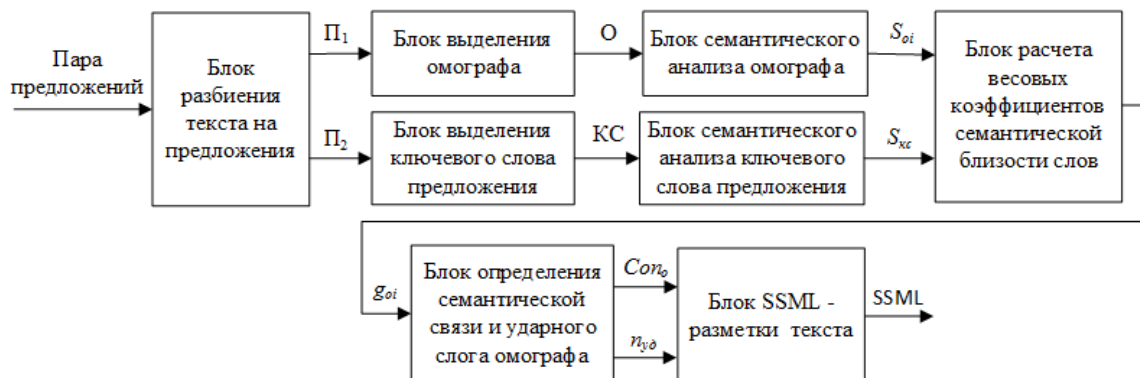


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического разрешения омографии на основе семантической связи слов смежных предложений

семантического анализа омографа для определения списка его семантических классов. Список слов второго предложения (Π_2) передается блоку выделения ключевого слова предложения, который на основе описанных в методике моделей предложений выделяет ключевое слово предложения. Ключевое слово предложения передается блоку семантического анализа ключевого слова предложения для определения его семантического класса.

В качестве инструмента для проведения автоматического семантического анализа слов использовался семантико-синтаксический анализатор Semsin [13–15], основанный на семантическом словаре Тузова [16]. Набор семантических классов омографа (S_{oi}) и семантический класс ключевого слова предложения (S_{kc}) передаются блоку расчета весовых коэффициентов семантической близости слов, кото-

рый рассчитывает весовые коэффициенты g_{oi} , используя формулу (1). Весовые коэффициенты g_{oi} передаются блоку определения семантической связи между омографом и ключевым словом предложения и выделения ударного слога в омографе. Данный блок определяет наличие семантической связи между омографом и ключевым словом предложения и номер ударного слога в омографе ($n_{уд}$). Номер ударного слога в омографе определяется семантическим классом омографа. Для автоматизации определения $n_{уд}$ был разработан специальный словарь, примеры элементов которого представлены в табл. 1.

В первом столбце табл. 1 находится омограф, во втором столбце – один из множества семантических классов омографа – одно из его семантических значений. Третий столбец содержит номер ударного слога в омографе.

Таблица 1

Пример определения ударного слога в омографе на основе его семантического класса

№	Омограф	Семантический класс омографа (S_{oi})	Номер ударного слога в омографе ($n_{уд}$)
1	Атлас	Знания, литература, книга	1 (атлас)
2	Атлас	Физический объект, материалы, волокно, ткани	2 (атлас)
3	Замок	Физический объект, поселения, постройка, жилье, дом	1 (замок)
4	Замок	Физический объект, вещь, утварь, инструменты	2 (замок)

Номер ударного слога в омографе передается блоку SSML-разметки текста, который отмечает омограф специальным SSML-маркером. SSML-разметка обработанного CE может быть передана синтезатору русской речи, который поддерживает стандарты SSML [17] для конвертации в искусственную речь.

Наличие семантической связи между омографом и ключевым словом предложения характеризуется параметром Con_o . Если между омографом и ключевым словом смежного предложения присутствует семантическая связь, то значение Con_o равно единице, иначе – нулю.

На базе реализованной системы был проведен эксперимент с использованием выборки, состоящей из 110 элементов – пар предложений. Выборка была разработана с использованием национального корпуса русского языка [18]. Первое предложение содержало исследуемый омограф, второе – ключевое слово, связанное по смыслу с данным омографом. Примеры пар предложений и результатов их обработки приведены в табл. 2.

Второй столбец табл. 2 содержит пары предложений, использовавшихся для проведения эксперимента, третий и четвертый столбцы содержат результаты обработки предложений системой.

Таблица 2

Примеры результатов обработки пар предложений системой

№	Пара предложений	Результаты автоматической обработки пар предложений системой	
		Con_o (наличие семантической связи)	$n_{уд}$ (номер ударного слога в омографе)
1	Какой орган? Сердце	1 (есть)	1 (орган)
2	Какой орган? Симфонический	1 (есть)	2 (орган)
3	Где атлас? У географа	1 (есть)	1(атлас)
4	Где атлас? Помидор	0 (нет)	– (отсутствует)

Оценка результатов работы системы автоматического разрешения омографии на основе семантической связи слов смежных предложений

Для возможности оценки качества работы системы был разработан дополнительный программный модуль. Функциональная схема данного модуля представлена на рис. 2.

На вход модуля подается элемент выборки, который обрабатывается вручную экспертом и автоматически системой. И эксперт, и система определяли два параметра: наличие семантической связи между омографом и ключевым словом смежного предло-

жения (Con_o) и номер ударного слога в омографе ($n_{уд}$). Эксперт анализировал данные на основе личного опыта работы со связным текстом и разрешением омографии, система использовала описанную методику.

В качестве экспертов были привлечены сотрудники отделения русского языка школы базовой инженерной подготовки Томского политехнического университета.

Все множество исследуемых пар предложений A было разбито на пять подмножеств:

1. Множество, содержащее пары предложений, в которых эксперт вручную разрешил омогра-

фию ($n_{уд}$) и выделил семантическую связь (Con_o) между омографом и ключевым словом смежного предложения (A_{ST}).

2. Множество, содержащее пары предложений, в которых эксперту не удалось выделить семантические связи между омографом и ключевым словом смежного предложения (и соответственно определить номер ударного слога в омографе) в силу их отсутствия (A_{SF}).

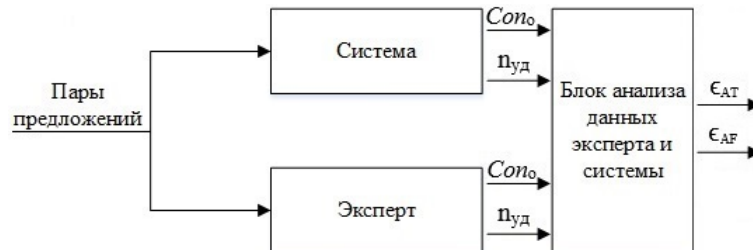


Рис. 2. Функциональная схема модуля оценки качества работы системы автоматического разрешения омографии на основе семантической связи слов смежных предложений

Для количественной оценки результатов работы системы были предложены четыре меры.

Мера первая – доля совпадения данных о парах предложений, содержащих Con_o (без учета $n_{уд}$), полученных на основе оценки эксперта и системы

$$\varepsilon_{AT} = \frac{|A_{AT} \cap A_{ST}|}{|A_{ST}|} \times 100\%.$$

Мера вторая – доля совпадения данных о парах предложений, которые содержат и Con_o и $n_{уд}$, которые были получены на основе оценки эксперта и системы:

$$\varepsilon_{ATT} = \frac{|A_{ATT} \cap A_{ST}|}{|A_{ST}|} \times 100\%.$$

Мера третья – доля совпадения данных о парах предложений, в которых отсутствуют семантические связи между омографом и ключевым словом смежного предложения. Они были получены на основе оценки системы и эксперта:

$$\varepsilon_{AF} = \frac{|A_{AF} \cap A_{SF}|}{|A_{SF}|} \times 100\%.$$

Мера четвертая – общая доля совпадения оценок системы и эксперта.

$$\varepsilon = \frac{|(A_{ATT} \cap A_{ST}) \cup (A_{AF} \cap A_{SF})|}{|A|} \times 100\%.$$

Для используемой в эксперименте выборки были вычислены значения мер:

$$\varepsilon_{AT} = 82,3\%; \varepsilon_{ATT} = 76,2\%; \varepsilon_{AF} = 87,5\%; \varepsilon = 74,1\%.$$

Значения всех четырех мер показывают, что в большинстве случаев вычисленные системой в автоматическом режиме значения Con_o (наличие семантической связи) и $n_{уд}$ (номер ударного слога в омографе) совпали с соответствующими значениями, предложенными экспертом.

По результатам проведенного эксперимента были сделаны следующие выводы:

3. Множество, содержащее пары предложений, в которых система автоматически определила Con_o , но не смогла определить $n_{уд}$ (A_{AT}).

4. Множество, содержащее пары предложений, в которых система не смогла определить $n_{уд}$ и Con_o (A_{AF}).

5. Множество, содержащее пары предложений, в которых система смогла определить и Con_o , и $n_{уд}$ (A_{ATT}).

Семантико-синтаксический анализатор Semsin не всегда формирует полный список семантических классов для исследуемых омографов. По этой причине система не может определить $n_{уд}$ при определении семантической связи Con_o . Например, в СЕ:

Где простынь? На кровати.

Для омографа «простынь» Semsin подобрал следующий список семантических классов:

$S_{o1} = \{ \text{жизнь, болезни, болезни человека} \};$

$S_{o2} = \{ \text{физический объект, температура, тепло} \}.$

Однако данный омограф имеет еще один семантический класс:

$S_o = \{ \text{физический объект, вещь, белье, постель} \}.$

Так как ключевое слово смежного предложения имеет семантический класс

$S_{kc} = \{ \text{физический объект, вещь, мебель} \},$

то отсутствие семантического класса S_o в списке семантических классов омографа влияет на результат работы системы (так как S_o наиболее близок к S_{kc}).

При сопоставлении семантических классов омографа с семантическим классом ключевого слова смежного предложения система определила неверное значение Con_o . Максимальный весовой коэффициент семантической близости для омографа был меньше коэффициента значимости $\max(g_{oi}) > p$. Для решения данной проблемы необходимо получить дополнительную информацию о зависимости коэффициента значимости от исследуемых семантических классов омографов.

3. В определенных случаях сопоставление семантических классов слов не даст нужного результата, так как слова могут быть связаны по смыслу, но не удовлетворять условию $\max(g_{oi}) > p$. Для решения данной проблемы необходимо провести более глубокий анализ контекста, в том числе и за пределами исследуемого текстового отрывка. Например:

Где жаркое? У повара.

Для омографа «жаркое» анализатор Semsin подобрал следующий список семантических классов:

$S_{o1} = \{ \text{физический объект, природа,}$
 погода, температура воздуха };

$S_{o2} = \{ \text{жизнь, пища, блюда, нерастительные} \}.$

Ключевое слово смежного предложения «повар» имеет семантический класс

$S_{kc} = \{ \text{физический объект, живой человек,}$
 личность, профессия, повар }.

При сопоставлении семантических классов S_{o2} и S_{kc} система определит значение $Con_o = 0$, однако в данном контексте между словами «жаркое» и «повар» существует семантическая связь.

Заключение

В данной статье описывается методика автоматического разрешения неоднозначности в омографах на основе данных смежного предложения. На базе методики построена система автоматического разрешения омографии на основе семантической связи слов смежных предложений. На специальной выборке проведен ряд экспериментов и получена оценка качества работы системы. В результате проведенных экспериментов были выявлены недостатки системы, связанные с невозможностью анализа слов в рамках контекста и неполнотой информации при автоматическом семантическом анализе.

Система автоматического разрешения неопределенности в омографах может быть использована в качестве дополнительного модуля в лингвистическом процессоре системы синтеза русской речи для повышения качества искусственной речи.

Анализ данных за пределами одного предложения позволяет существенно повысить качество автоматической разметки текста для синтеза речи.

Литература

1. Лобанов Б.М. Проблема разрешения «Ё»-омографов при синтезе речи по тексту // Тр. междунар. конф. «Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии». – М.: Наука, 2009. – С. 330–338.
2. Розенталь Д.Э. Словарь-справочник лингвистических терминов / Д.Э. Розенталь, М.А. Теленкова. – М.: Просвещение, 1985. – 399 с.
3. Common Homographs in English (With Examples) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://7esl.com/homographs/>, свободный (дата обращения: 15.09.2018).
4. О разной трактовке соотношения омонимов, омофонов, омографов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.russkayarech.ru/files/issues/2012/3/09-ruchimskaja.pdf>, свободный (дата обращения: 21.09.2018).
5. Homograph Disambiguation in Text-to-Speech Synthesis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cs.toronto.edu/~gpenn/csc2518/progress_chp12.pdf, свободный (дата обращения: 12.09.2018).
6. The automatically built up homograph dictionary – a component of a dynamic lexical system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aclweb.org/anthology/C73-2032>, свободный (дата обращения: 17.09.2018).
7. Рыбин С.В. Синтез речи: учеб. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2014. – 92 с.
8. Хомицевич О.Г. Использование лингвистического анализа для нормализации текста и снятия омонимии в системе синтеза русской речи / О.Г. Хомицевич, С.В. Ры-

бин, И.М. Аничкин // Изв. вузов. Приборостроение. Тематический выпуск «Речевые информационные системы». – 2013. – № 2. – С. 42–46.

9. Солганик Г.Я. Синтаксическая стилистика. Сложное синтаксическое. – М.: Высшая школа, 1991. – 182 с.

10. Левковская Н.А. В чём различие между сверхфразовым единством и абзацем? // Филологические науки. – 1980. – № 1. – С. 75–78.

11. Филимонов О.И. Скрепа-фраза в языке. – М.: АГРУС, 2017. – 170 с.

12. Гребенкова Ю.Н. Словарь омографов русского языка. – Ливны: Издатель Г.В. Мухаметов, 2012. – 278 с.

13. Боярский К.К. Выявление анафорических отношений при автоматическом анализе текста. / К.К. Боярский, Е.А. Каневский // Научно-технический вестник информационных технологий механики и оптики. – 2013. – № 5. – С. 108–112.

14. Боярский К.К. Предсинтаксический модуль в анализаторе Semsin / К.К. Боярский, Е.А. Каневский // Интернет и современное общество. – 2013. – № 1. – С. 280–286.

15. Боярский К.К. Семантико-синтаксический анализатор Semsin / К.К. Боярский, Е.А. Каневский // Научно-технический вестник информационных технологий механики и оптики. – 2015. – № 5. – С. 869–876.

16. Тузов В.А. Компьютерная семантика русского языка. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 400 с.

17. Speech Synthesis Markup Language (SSML) Version 1.1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/speech-synthesis/>, свободный (дата обращения: 15.05.2018).

18. Гришина Е.А. Национальный корпус русского языка: 2006–2008. Новые результаты и перспективы // Нестор-История. – 2009. – № 6. – С. 150–174.

Чемерилов Владимир Викторович

Аспирант отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР) Томского политехнического университета (ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
 Тел.: +7-923-410-93-87
 Эл. почта: Vchemerilov@gmail.com

Фадеев Александр Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент отделения информационных технологий ИШИТР ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
 Тел.: +7 (382-2) 70-63-30
 Эл. почта: fas@tpu.ru

Chemerilov V.V., Fadeev A.S.

System of automatic homography resolution based on the semantic connection words of adjacent sentences in a text passage

This paper describes a technique to automatically resolve homographs in interrogative sentences based on a semantic connection with the answer. The results of the semantic analysis of the Semsin parser are used as input data. Based on this technique, a software algorithm was developed that allows to mark automatically homographs with an SSML tag that changes the acoustic characteristics of synthesized speech. On

a special test sample consisting of phrase units, an experiment conducted to evaluate the quality of the algorithm, which gave positive results. In the course of work, shortcomings related to errors in the semantic analysis of the Semsin parser and the inability to recognize the context within a single sentence were revealed.

Keywords: Russian text-to-speech systems, semantic connection of sentences, homography resolution, homographs, interrogative sentence, super phrase units, Semsin parser.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-42-48

References

1. Lobanov B.M. The problem of resolving «E»-omographs in the synthesis of speech in the text. *Proceedings of the International Conference «Computer Linguistics and Intellectual Technologies»*, 2009, pp. 330–338.
2. Rosenthal D.E., Telenkova M.A. *Slovar-spravochnik lingvisticheskikh terminov*. Enlightenment, 1985, 399 p.
3. Common Homographs in English (With Examples). URL: <https://7esl.com/homographs/>.
4. About different interpretation of homonyms, homophones, homographs. URL: <http://www.russkayarech.ru/files/issues/2012/3/09-ruchimskaja.pdf>
5. Homograph Disambiguation in Text-to-Speech Synthesis. URL: http://www.cs.toronto.edu/~gpenn/csc2518/progress_chp12.pdf
6. The automatically built up homograph dictionary – a component of a dynamic lexical system. URL: <http://www.aclweb.org/anthology/C73-2032>.
7. Rybin S.V. *Sintez rechi. Uchebnoe posobie*. St. Petersburg: ITMO University, 2014, 92 p.
8. Khomitsevich O.G., Rybin S.V., Anichkin I.M. Use of linguistic analysis for the normalization of the text and the removal of homonymy in the system of synthesis of Russian speech. *Thematic issue «Speech Information Systems»*, 2013, pp. 42–46.
9. Solganik G.Y. *Sintaksicheskaya stilistika. Slozhnoe sintaksicheskoe*, 1991, 182 p.
10. Levkovskaya N.A. What is the difference between superphrase unity and a paragraph? *Philological Sciences*, 1980, pp. 75–78.
11. Filimonov O.I. *Skrepa-fraza v yazyke*. AGRUS, 2017, 170 p.
12. Grebenkova Y.N., Kanevsky E.A. *Slovar omografov russkogo yazyka*, 2012, 278 p.
13. Boyarsky K.K. Identification of anaphoric relations in automatic text analysis. *Scientific and Technical Herald of Information Technologies of Mechanics and Optics*, 2013, pp. 108–112.
14. Boyarsky K.K., Kanevsky E.A. Presyntactic module in the Semsin. *Inter-no and modern society*, 2013, pp. 280–286.
15. Boyarsky K.K., Kanevsky E.A. Parser Semsin *Scientific and Technical Herald of Information Technologies of Mechanics and Optics*, 2015, pp. 869–876.
16. Tuzov V.A. *Kompyuternaya semantika russkogo yazyka*. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg State University, 2004, 400 p.
17. Burnett D., Walker M., Hunt A. Speech Synthesis Markup Language (SSML) Version 1.1, W3C Recommendation, 2014.
18. Grishina E. A. National building of the Russian language: 2006–2008. New results and prospects. *Nestor-History*, 2009, pp. 150–174.

Vladimir V. Chemerilov

PhD student, School of Information Technology and Robotics, Tomsk Polytechnic University (TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-410-93-87
Email: Vchemerilov@gmail.com

Alexander S. Fadeev

PhD, Associate Professor, School of Information Technology and Robotics, Tomsk Polytechnic University (TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-63-30
Email: fas@tpu.ru

УДК 004.02+519.1

А.В. Погребной

Выделение общей части в версиях исходного кода программ, представленного графовой моделью

Решение задач анализа структурного сходства объектов на основе применения графовых моделей (ГМ) является одним из актуальных направлений исследований в прикладной теории графов. В статье в качестве объектов для анализа сходства рассматриваются версии исходного кода программ. Существующие системы управления версиями (СУВ) при решении данной задачи работают непосредственно с текстами исходных кодов версий программ. Наделяние СУВ возможностью работать с ГМ, адекватно представляющими исходный код версий программ, позволяет существенно улучшить качество выполнения традиционных функций СУВ и расширить инструментарий по сопровождению процесса разработки программ. Оценивать сходство версий программ предлагается на основе выделения в них наибольшей общей части, т.е. наибольшего общего подграфа. Цель исследований заключается в разработке метода решения задачи выделения наибольшей общей части в версиях программ, представленных в виде ГМ. Исследования базируются на применении предложенной автором теории дифференциации вершин графа, в которой модель структуры графа представляется в виде сети автоматов. Важным преимуществом метода является его способность легко адаптироваться к особенностям написания исходного кода программы и используемой версии языка программирования. Метод включает три этапа – составление и кодирование списков атрибутов, приписанных вершинам и дугам ГМ; преобразование ГМ в стандартную форму в виде ориентированного графа; выделение общей части в двух ориентированных графах, представляющих сравниваемые версии программы. Алгоритм выделения общей части, работая со стандартными формами представления ГМ, является инвариантным относительно особенностей описания ГМ и набора используемых атрибутов. Приводится пример решения задачи выделения общей части для двух сравниваемых фрагментов ГМ.

Ключевые слова: графовая модель программы, система управления версиями, общая часть двух графов, подстановка сходства графов, дифференциация вершин графов.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-49-56

Разработка программной системы, как правило, связывается с созданием последовательности работоспособных версий [1–3]. За время разработки над проектом обычно работает множество человек, которые постоянно вносят изменения в исходный код программы. Таким образом, накапливается множество версий исходного кода программы, с которыми невозможно работать без специальных инструментов.

Для работы с версиями программ применяются системы управления версиями (СУВ) [4, 5], например: Git, Mercurial [6, 7]. Данные СУВ работают непосредственно с текстами исходных кодов версий программ. Это порождает ряд проблем, связанных с неоднозначностью форматирования текстов исходного кода, а также невозможностью анализа изменений с целью более интеллектуального разрешения возникающих конфликтов.

Исходный код программ для различных целей представляется в виде самых разных графовых моделей (ГМ) [8–10]. В [11] для поддержки процесса разработки и анализа программ предложено исходный код представлять в виде ГМ, полностью описывающей исходный код программы, т.е. позволяющей конвертировать графовую модель обратно в исходный код без потерь какой-либо информации.

В предлагаемой ГМ вершинами являются фрагменты синтаксических конструкций языка, такие как объявления переменных, вызовов операторов или функций. Соответственно для разных языков программирования правила построения такого графа будут различаться. На рис. 1 приведён пример ГМ для фрагмента исходного кода на языке Java.

В примере для удобства визуализации все вершины разделены на два типа – данные и модули (некоторые действия). Данные в ГМ (замкнутые кривые) имеют три вида изображения. Сплошная линия соответствует локальной переменной. Сплошная линия с точкой отражает свойство класса. Пунктиром изображается промежуточная переменная без указания имени.

Модули изображаются прямоугольниками двух видов. Прямоугольник без точки соответствует модулю, выполняющему оператор, метод. Прямоугольник с точкой обозначает объявление метода класса.

Информационные связи изображаются с указанием стрелок. В тех случаях, когда информационные входы в модуль необходимо различать, то у стрелки входной дуги указывается номер входа (например, для цикла `for`). Связь без ориентации применяется для отражения принадлежности модуля или свойства объекту.

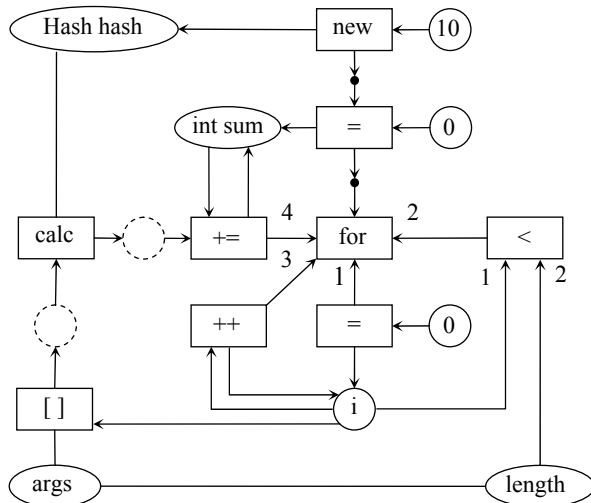
Управляющие связи (m_{j_1}, m_{j_2}) между модулями помечаются точками, которые условно воспринимаются в качестве переменных. Такие переменные соответствуют появлению сигнала о том, что модуль m_{j_1} закончил работу, а модуль m_{j_2} может приступать к выполнению.

Приведенный на рис. 1 набор элементов визуализации представляет только те синтаксические конструкции языка Java, которые задействованы в приведенном примере. Этот набор для языка в целом содержит и другие элементы, которые здесь не представлены.

```

Hash hash = new Hash(10);
int sum = 0;
for (int i = 0; i < args.length; i++) {
    sum += hash.calc(args[i]);
}

```



```

class Hash {
    private int b;
    Hash(int b) {
        this.b = b;
    }
    int calc(int a) {
        return (a + b) * 3;
    }
}

```

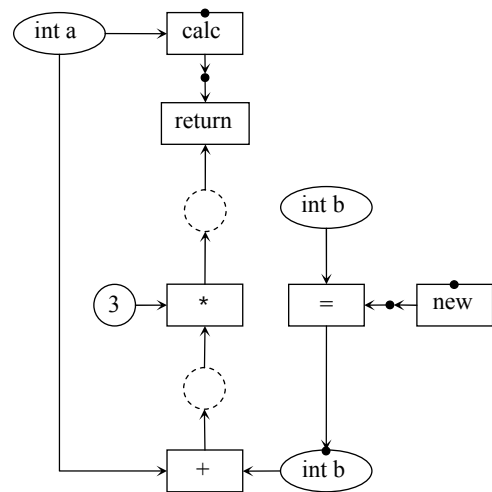


Рис. 1. Пример ГМ для фрагмента исходного кода на языке Java

Таким образом, каждая вершина в графе имеет набор атрибутов, необходимых для адекватного представления исходного кода. Атрибут, который есть у всех вершин, – это тип вершины. Он же определяет, какие атрибуты могут быть у вершины. Например, если тип вершины – объявление переменной, то у неё будет два атрибута: тип переменной и её имя. Также в атрибутах вершин содержится различная информация о форматировании исходного кода вроде отступов, которая позволяет восстановить исходный код по ГМ.

Наряду с задачами анализа функционирования программ построение такой ГМ даёт возможность расширить и повысить эффективность выполнения задач СУВ. Функционирование СУВ, основанной на ГМ, будет включать три этапа:

1. Построение ГМ для исходного кода.
2. Выявление различий в ГМ, представляющих две разных версии исходного кода.
3. Интерпретация и анализ полученных на предыдущем этапе различий.

Решению второго этапа в условиях, когда версии программы представлены в виде ГМ₁ и ГМ₂, посвящена данная статья.

В статье предлагается метод, основанный на преобразовании ГМ в стандартную форму представления в виде ориентированного графа. По этому методу версии ГМ₁ и ГМ₂ преобразуются соответственно в ориентированные графы G_1 и G_2 . Задача выделения общей части в версиях программ в этом случае сводится к задаче определения сходства двух

ориентированных графов G_1 и G_2 . Таким образом, достигается независимость алгоритма от выбранного языка программирования. Обычно при решении задач сходства используются косвенные оценки, как, например, в [12, 13]. В версиях же программ для работы СУВ необходимо определение наибольшей общей части, поэтому задача решается на основе методов, изложенных в [14]. После выделения в графах G_1 и G_2 общей части в виде подграфа Q она может быть представлена отдельной ГМ_Q и при необходимости преобразована в текстовую форму в виде исходного кода.

Метод выделения общей части в графовых моделях версий программ

Представление версий программы в виде ГМ сопровождается указанием большого разнообразия атрибутов, приписываемых вершинам и рёбрам ГМ [11]. Такое представление позволяет на основе структуры ГМ и множества атрибутов восстановить исходный код соответствующей версии программы. Вместе с тем исследования показали, что выделение общих частей в версиях непосредственно на основе ГМ₁ и ГМ₂ оказалось трудно реализовать по ряду причин: громоздкое описание ГМ; отсутствие возможности применения метода взаимозависимой дифференциации вершин для определения сходства структур графов [14]; зависимость алгоритма выделения общей части от версий языка программирования.

Каждая из приведенных выше причин указывает на необходимость разработки иного подхода к решению проблемы выделения общих частей в вер-

сиях программ и его применения в составе СУВ. В основу этого подхода положено предварительное преобразование ГМ в стандартную форму, которая не зависит от состава атрибутов, используемых в ГМ.

В данном подходе все особенности исходного кода, в том числе и для разных языков, должны учитываться на стадии формирования описания ГМ и базовых списков атрибутов. Преобразование ГМ в стандартную форму выполняется по универсальным правилам и независимо от особенностей исходного кода представляет версии ГМ₁ и ГМ₂ ориентированными графами G_1 и G_2 соответственно.

Решение проблемы выделения общей части включает три этапа. На первом этапе на основе описания ГМ формируются новые или уточняются имеющиеся базовые списки атрибутов (V, X, Y, \dots) для вершин и (W, B, H) для дуг. Эти списки отражают особенности языка программирования и включают множества атрибутов, используемых при описании ГМ.

Список V включает атрибуты вида вершин (оператор, переменная, метод, константа и т.д.). Списки X, Y, \dots соответствуют идентификаторам вершин, типам вершин и другим атрибутам, входящим в описание вершины. Список W включает атрибуты вида дуг (информационные, управляющие, отражающие отношение принадлежности, зависимости и т.д.). Списки B, H содержат атрибуты, характеризующие входы и выходы дуг.

На втором этапе выполняются операции по преобразованию ГМ₁ и ГМ₂ в G_1 и G_2 . Предварительно базовые списки атрибутов пополняются новыми атрибутами из описаний ГМ₁ и ГМ₂. Далее каждая ГМ представляется четвёркой (E, U, A_E, A_U) , включающей множество вершин E , множество дуг U , множество кодов атрибутов вершин $A_E = \{e_i(V_i, x_i, y_i, \dots)\}$, множество кодов атрибутов дуг $A_U = \{(e_j, e_i)(W_{ji}, b_i, h_j)\}$. Здесь коды (V_i, x_i, y_i, \dots) и (W_{ji}, b_i, h_j) являются порядковыми номерами соответствующих атрибутов вершин и дуг, которые они занимают в базовых списках (V, X, Y, \dots) и (W, B, H).

В итоге описания ГМ₁ и ГМ₂ представляются ориентированными графами G_1 и G_2 , у которых атрибуты вершин и дуг заменены на порядковые номера (коды) в соответствующих списках. Структура каждого графа представляется в виде списка инциденторов входных вершин $\{e_i(F(e_i))\}$, где инцидентор $F(e_i)$ включает множество вершин e_j , из которых дуги выходят и поступают на вход в вершину e_i . Коды атрибутов для вершин e_i и дуг (e_j, e_i) представляются множествами записей в виде $\{e_i(V_i, x_i, y_i, \dots)\}$ и $\{(e_j, e_i)(W_{ji}, b_i, h_j)\}$. При отсутствии b_i и h_j указывается только W_{ji} , т.е. запись имеет вид $(e_j, e_i)(W_{ji})$. Если отсутствует b_i или h_j , то записи имеют вид $(e_j, e_i)(W_{ji}, \emptyset, h_j)$ или $(e_j, e_i)(W_{ji}, b_i)$.

Третий этап включает реализацию алгоритма выделения в графах G_1 и G_2 общей части Q . В основу алгоритма положен метод оценивания сходства структур двух графов [11]. Общая часть Q соответ-

ствует подстановке сходства вершин графов G_1 и G_2 , которой соответствует наибольшее число совпадающих дуг. Перед решением задачи выделения общей части в графах G_1 и G_2 удаляются вершины и связанные с ними дуги, которые не могут войти в общую часть. Вершина e_i удаляется из графа G_1 , если запись $e_i(V_i, x_i, y_i, \dots)$ отсутствует среди записей для графа G_2 . Аналогично из графа G_2 вершина удаляется, если её запись не найдена среди записей графа G_1 . Оставшиеся части графов G_1 и G_2 обозначим графами G и H . При этом часть с меньшим числом вершин будем обозначать как G . Графы G и H характеризуются тем, что для каждой записи в графе G есть совпадающая с ней запись в графе H .

Задача выделения общей части в ГМ₁ и ГМ₂ решается на соответствующих графах $G = (E_G, U_G)$ и $H = (E_H, U_H)$. Каждый из них представлен списком инциденторов $\{e_i(F(e_i))\}$ и множествами записей кодов атрибутов вершин $\{e_i(V_i, x_i, y_i, \dots)\}$ и дуг $\{(e_j, e_i)(W_{ji}, b_i, h_j)\}$. Решение основывается на применении метода взаимозависимой дифференциации вершин графов G и H .

Для применения метода определяются начальные состояния моделей структур графов. С этой целью в графе G для каждой i -й записи в множестве $\{e_i(V_i, x_i, y_i, \dots)\}$ назначается код d_i^0 – интегральный описатель кодов атрибутов вершины e_i . Запись с наименьшим числом атрибутов и минимальным значением среди V_i , затем среди x_i и т.д. получает код $d_i^0 = 1$. Все записи, совпадающие с выбранной, также получают код $d_i^0 = 1$. Выбор записей для назначения кода $d_i^0 = 2$ производится среди оставшихся записей аналогично. В итоге все различающиеся записи получают разные коды d_i^0 . В графе H вершины e_j получают код $d_j^0 = d_i^0$, если записи вершин e_i и e_j в графах G и H совпадают.

После назначения вершинам $e_i \in E_G$ кодов d_i^0 , а вершинам $e_j \in E_H$ кодов d_j^0 начальное состояние моделей структур графов G и H представляется векторами $\mathbf{D}_G^0 = \{d_i^0\}$ и $\mathbf{D}_H^0 = \{d_j^0\}$. С учётом инциденторов вершин получим векторы $\mathbf{D}_G^0(F) = \{d_i^0(F(d_i^0))\}$ и $\mathbf{D}_H^0(F) = \{d_j^0(F(d_j^0))\}$. В инциденторах $F(d_i^0)$ и $F(d_j^0)$ помимо кодов входных вершин указываются коды атрибутов соответствующих дуг, например: $F(d_{10}^0) = (d_6^0(W_{6,10}, \emptyset, h_6), d_{14}^0(W_{14,10}), d_{20}^0(W_{20,10}, b_{10}))$.

Сохранение в записях инциденторов кодов атрибутов дуг в виде (W_{ji}, b_i, h_j) позволяет сравнивать и выделять в графах G и H дуги с частично совпадающими атрибутами. Это важно в условиях, когда выделение общей части соответствует поиску подстановки сходства с наибольшим числом полностью или частично совпадающих дуг.

Основные положения метода выделения общей части разработаны с учётом особенностей графов G и H и заключаются в следующем:

1. Векторы $\mathbf{D}_G^0(F)$ и $\mathbf{D}_H^0(F)$ отражают начальную дифференциацию вершин и разбивают их на группы $E_d^0(G)$ и $E_d^0(H)$ независимо от степеней по входным дугам. Из этого следует, что шаги взаимозависимой дифференциации должны предусматривать возможность интеграции частей совпадающих кодов вершин в сопоставляемых инциденторах $F(d_i^k)$ и $F(d_j^k)$. При интеграции допускается также частичное совпадение кодов атрибутов соответствующих дуг.

2. Подстановка сходства $Z_{GH} = \{(e_i, e_j)\}$ графов G и H состоит из пар (e_i, e_j) с вершинами $e_i \in E_d^0(G)$ и $e_j \in E_d^0(H)$, выбранными из пар групп $(E_d^0(G), E_d^0(H))$ с кодами $d_i^0 = d_j^0 = d$. Таким образом, область поиска вариантов пар (e_i, e_j) для включения в Z_{GH} ограничивается величиной $\sum_d (|E_d^0(G)| \times |E_d^0(H)|)$. При этом для каждого d число выбираемых пар (e_i, e_j) не превышает значение $\min(|E_d^0(G)|, |E_d^0(H)|)$.

3. Выбор пар (e_i, e_j) для включения в Z_{GH} сводится к поиску наилучшего соответствия кодов в инциденторах $F(d_i^k)$ и $F(d_j^k)$ среди пар групп в множестве $\{(E_d^k(G), E_d^k(H))\}$. Степень соответствия кодов в инциденторах $F(d_i^k)$ и $F(d_j^k)$, $d_i^k = d_j^k = d$ оценивается величиной $r_{ij}(d)$:

$$r_{ij}(d) = (r_d + r_w / g_w + r_b / g_b + r_h / g_h) / g_{ij}. \quad (1)$$

Здесь r_d – число пар взаимно однозначного соответствия вершин с равными кодами d , взятых из i -го и j -го инцидентора;

r_w, r_b, r_h – числа пар кодов по соответствующим атрибутам дуг W, b, h , которые оказались равными для выделенных в числе r_d пар вершин;

g_w, g_b, g_h – минимальные количества кодов атрибутов дуг среди пар совокупностей $(W), (W, b)$ или (W, b, h) , приписанных к вершинам, которые образовали пары с равными кодами W, b, h в количестве r_w, r_b, r_h соответственно;

g_{ij} – минимальное число вершин в одном из сравниваемых инциденторов $F(d_i^k)$ и $F(d_j^k)$.

Например, для инциденторов $(2(1,3), 4(8), 6(2, \emptyset, 3))$ и $(2(1,4), 4(8,14), 6(2), 6(2, \emptyset, 3))$, согласно (1), $r_{ij}(d) = (3 + 1/2 + 1/2 + 1/3 + 1/3 + 1/3) / 3 = 5/3$. Заметим, что вершина $4(8)$ в паре с вершиной $4(8,14)$ воспринимается как $4(8, \emptyset)$.

В множестве пар $\{(E_d^k(G), E_d^k(H))\}$, выбор пары для продолжения дифференциации вершин осуществляется по наибольшему значению $r_{ij}^*(d)$:

$$r_{ij}^*(d) = \max_d \{ \max_{i,j} \{ r_{ij}(d) \} \}. \quad (2)$$

Поиск подстановки сходства Z_{GH}^* с наибольшим числом совпадающих дуг в общей части осуществляется на дереве траекторий процесса дифференциации вершин [14].

Изложенный выше подход позволяет разработать единый алгоритм решения задачи выделения общей части, инвариантный относительно специфики ГМ₁ и ГМ₂ и состава атрибутов. Общей частью Q принимаются совпадающие в графах G_1 и G_2 частичные подграфы с наибольшим числом дуг.

Алгоритм выделения общей части

Исходными данными для алгоритма являются описание ГМ₁ и ГМ₂ в виде ориентированных графов G_1 и G_2 . Графы представлены списками инциденторов вершин $\{e_i(F(e_i))\}$, множествами записей кодов атрибутов вершин $\{e_i(V_i, x_i, y_i, \dots)\}$ и дуг $\{(e_j, e_i)(W_{ji}, b_i, h_j)\}$.

Алгоритм включает следующие операции:

1. Формирование графов G и H . Для этого у всех пар вершин $(e_i, e_j) \in (E_{G_1} \times E_{G_2})$ сопоставляются записи в множествах $\{e_i(V_i, x_i, y_i, \dots)\}_{G_1}$ и $\{e_j(V_j, x_j, y_j, \dots)\}_{G_2}$. Если совпадающих записей не найдено, то вершины e_i и e_j исключаются из графов G_1 и G_2 . Сохранившиеся подмножества вершин в графах G_1 и G_2 и дуг между этими вершинами представляют графы G и H .

2. Определение векторов $\mathbf{D}_G^k(F)$ и $\mathbf{D}_H^k(F)$ начальных состояний моделей структур графов G и H . Графы представлены списками инциденторов вершин $\{e_i(F(e_i))\}_G$ и $\{e_j(F(e_j))\}_H$, множествами записей кодов атрибутов вершин $\{e_i(V_i, x_i, y_i, \dots)\}_G$ и $\{e_j(V_j, x_j, y_j, \dots)\}_H$ и дуг $\{(e_q, e_i)(W_{qi}, b_i, h_q)\}_G$ и $\{(e_r, e_j)(W_{rj}, b_j, h_r)\}_H$. Каждой записи $\{e_i(V_i, x_i, y_i, \dots)\}_G$ для $e_i \in E_G$ и записи $\{e_j(V_j, x_j, y_j, \dots)\}_H$ для $e_j \in E_H$ назначаются коды d_i^0, d_j^0 – интегральные описатели кодов атрибутов данных вершин. Далее по спискам $\{e_i(F(e_i))\}_G$ и $\{e_j(F(e_j))\}_H$ формируются списки $\{d_i^0(F(d_i^0))\}_G$ и $\{d_j^0(F(d_j^0))\}_H$ векторов $\mathbf{D}_G^0(F)$ и $\mathbf{D}_H^0(F)$. При этом каждой вершине $e_q \in F(d_i^0)$ и $e_r \in F(d_j^0)$ приписываются записи из множеств $\{(W_{qi}, b_i, h_q)\}_G$ и $\{(W_{rj}, b_j, h_r)\}_H$ для соответствующих дуг (e_q, e_i) и (e_r, e_j) .

3. Выполнение шага взаимозависимой дифференциации вершин путём преобразований $\mathbf{D}_G^0(F) \Rightarrow \mathbf{D}_G^1(F)$ и $\mathbf{D}_H^0(F) \Rightarrow \mathbf{D}_H^1(F)$. В векторах $\mathbf{D}_G^0(F)$ и $\mathbf{D}_H^0(F)$ выделяются пары вершин (e_i, e_j) с уникальными и совпадающими записями $d_i^0(F(d_i^0)) = d_j^0(F(d_j^0))$. Для таких вершин принимается $d_i^1 = d_i^0$ и $d_j^1 = d_j^0$. Далее выделяются пары вершин с уникальными записями, у которых

$d_i^0 = d_j^0$, а инциденторы $F(d_i^0)$ и $F(d_j^0)$ не совпадают частично или полностью. Для этих вершин также принимается $d_i^1 = d_i^0$ и $d_j^1 = d_j^0$.

Вершины, не получившие коды d_i^1, d_j^1 , разбиваются на пары базовых групп $(E_d^0(G), E_d^0(H))$. Среди них выбираются пары, которые не содержат переходы на альтернативные траектории дифференциации вершин. Этим свойством обладают пары, в которых одна из групп содержит одну запись, совпадающую частично или полностью только с одной записью в другой группе. Соответствующие вершины e_i и e_j получают коды $d_i^1 = d_j^1 = d$.

Далее выделяются пары групп, у которых величины $r_{ij}(d)$, вычисленные по (1), однозначно устанавливают соответствие в парах вершин $\{(e_i, e_j)\}$. При этом одна пара (e_i, e_j) получает коды $d_i^1 = d_j^1 = d$, а остальные получают коды $d_i^1 = d_j^1$, равные одному из незанятых кодов d_i^1 в последовательности $(1, 2, \dots, |E_G|)$.

Среди оставшихся пар групп, согласно (2), выбирается пара $(E_d^0(G), E_d^0(H))$ с наибольшим значением $r_{ij}^*(d)$. Вершины (e_i, e_j) , соответствующие величине $r_{ij}^*(d)$, получают коды $d_i^1 = d_j^1 = d$. Вершины (e_i, e_j) с $r_{ij}(d) \leq r_{ij}^*(d)$ получают маскирующие коды $d_i^1 = d_j^1 = d^*$ и включаются в множество E_*^1 в качестве точек запуска альтернативных траекторий.

4. Выполнение шага дифференциации $\mathbf{D}_G^1(F) \Rightarrow \mathbf{D}_G^2(F)$, $\mathbf{D}_H^1(F) \Rightarrow \mathbf{D}_H^2(F)$. Этот и последующие шаги $\mathbf{D}_G^k(F) \Rightarrow \mathbf{D}_G^{k+1}(F)$, $\mathbf{D}_H^k(F) \Rightarrow \mathbf{D}_H^{k+1}(F)$ выполняются операцией 3 до полной дифференциации вершин графа G . При этом на каждом k -м шаге уникальные коды d_i^k и d_j^k сохраняются, а коды d_i^{k+1} и d_j^{k+1} назначаются из незанятых значений множества $(1, 2, \dots, |E_G|)$. Для состояния полной дифференциации $\mathbf{D}_G(F)$ и $\mathbf{D}_H(F)$ определяется подстановка сходства Z_{GH} и соответствующая общая часть Q с числом дуг m_Q .

5. Поиск подстановки сходства Z_{GH}^* с наибольшим числом дуг m_Q^* в общей части Q . Если совокупность $\{E_*^k\}$ содержит множество точек запуска $E_*^k \neq \emptyset$, то дифференциация выполняется также и по альтернативным траекториям. При этом дерево траекторий может просматриваться полностью либо частично с применением схемы поиска по методу ветвей и границ [14, 15].

Работу алгоритма покажем на примере выделения общей части в графах G и H , которые визуальным образом представлены на рис. 2. Здесь же приведены списки кодов атрибутов вершин и дуг.

Графы на рис. 2 содержат четыре вида вершин, $V_i, V_j = (1, 2, 3, 4)$, и три вида дуг, $W_{qi}, W_{rj} = (1, 2, 3)$. В списках кодов атрибутов вершин указаны их интегральные описатели d_i^0, d_j^0 . Исходя из определения графов G и H , для каждого d_i^0 должен существовать один или несколько $d_j^0 = d_i^0$. Аналогично для каждого d_j^0 существует один или несколько $d_i^0 = d_j^0$. Из этого, с учётом $|E_G| \leq |E_H|$, следует, что общая часть $Q(G, H)$ может включать все вершины графа G или их часть.

Результаты работы алгоритма выделения общей части в графах G и H (см. рис. 2) приведены на рис. 3. Структуры графов представлены списками инциденторов $\{e_i(F(e_i))\}$ и $\{e_j(F(e_j))\}$, в которых инциденторы включают только входные вершины. Если вершины e_i или e_j не имеют входов, то соответствующие инциденторы $F(e_i) = F(e_j) = \emptyset$. В графе G – это вершины e_7, e_{13} , в графе H – вершины e_1, e_5 .

Начальные состояния моделей структур $\{d_i^0(F(d_i^0))\}, \{d_j^0(F(d_j^0))\}$ получены в результате замены номеров вершин e_i, e_j в списках инциденторов на соответствующие интегральные описатели d_i^0, d_j^0 . При этом к описателям $d_q^0 \in F(d_i^0)$ и $d_r^0 \in F(d_j^0)$ приписываются коды атрибутов дуг (W_{qi}, b_i, h_q) и (W_{rj}, b_j, h_r) .

Результаты выполнения операции 3 алгоритма по назначению d_i^1 и d_j^1 при переходе $\mathbf{D}^0(F) \Rightarrow \mathbf{D}^1(F)$ отражены на рис. 3 отдельными колонками по каждому из четырёх признаков. По признаку уникальных совпадающих инциденторов назначены коды (5, 8, 6, 9, 3, 4, 11). По признаку совпадения уникальных кодов вершин с разными и частично или полностью совпадающими инциденторами назначены коды (7, 10). По следующему признаку сопоставляются группы с числом вершин $|E_1^0(G)|=1$ и $|E_1^0(H)|=3$, которые не содержат переходы на альтернативные траектории, так как группа $E_1^0(G)$ включает одну вершину. Пара вершин (e_2, e_6) из этих групп получает код $d_2^1 = d_6^1 = 1$.

По отдельному четвёртому признаку сопоставляется другая пара групп $(E_2^0(G), E_2^0(H))$, которая также оказалась без альтернативных траекторий. Здесь для одной пары вершин (e_8, e_4) с наибольшим значением $r_{8,4}(2) = (3+3/1)/3 = 2$ сохранён код $d_8^1 = d_4^1 = 2$. Пара вершин (e_6, e_{10}) с оценкой $r_{6,10}(2) = (2+2/1)/2 = 2$ получила минимальный незанятый код $d_6^1 = d_{10}^1 = 12$. Оставшаяся пара вершин (e_{10}, e_{12}) с оценкой $r_{10,12}(2) = (1+1/1)/2 = 1$ получает код $d_{10}^1 = d_{12}^1 = 13$.

Пример на рис. 3 не содержит пар групп, порождающих альтернативные траектории.

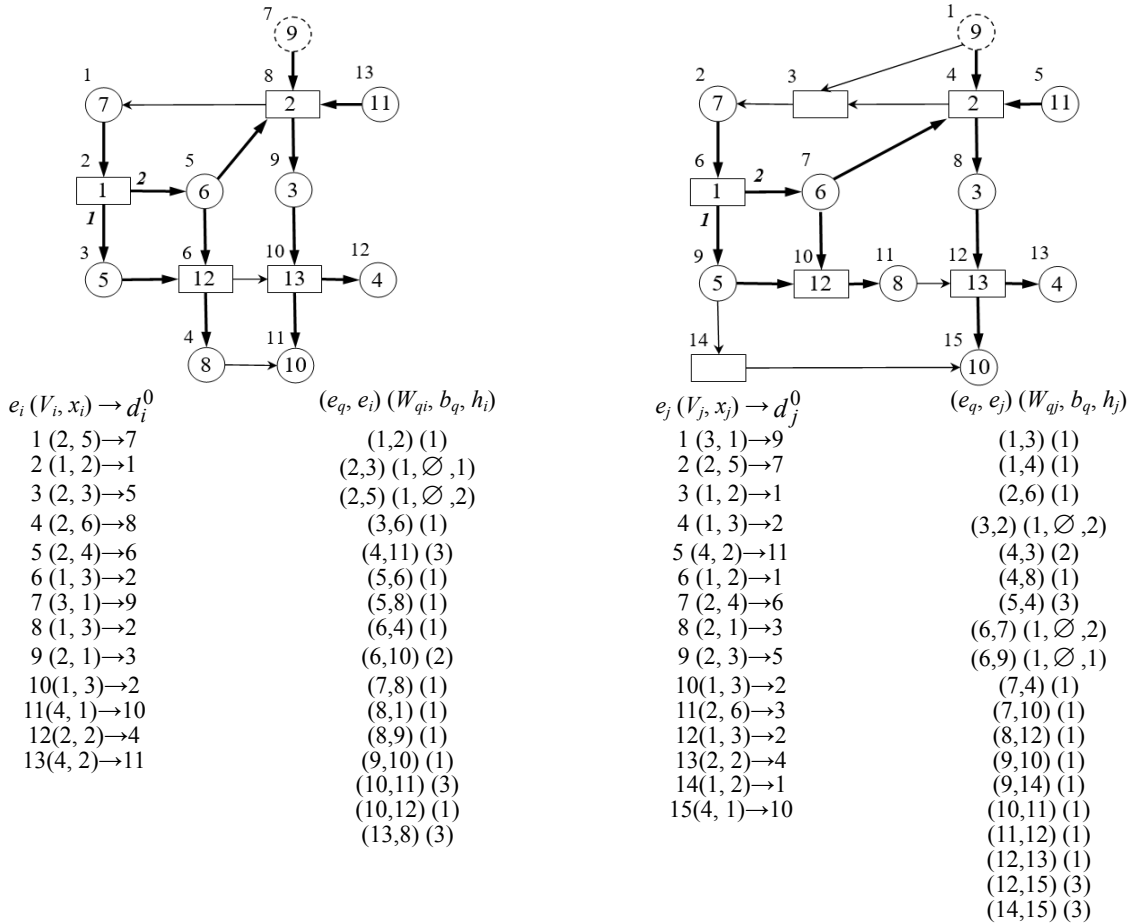


Рис. 2. Примеры графов G и H и списков кодов атрибутов вершин и дуг

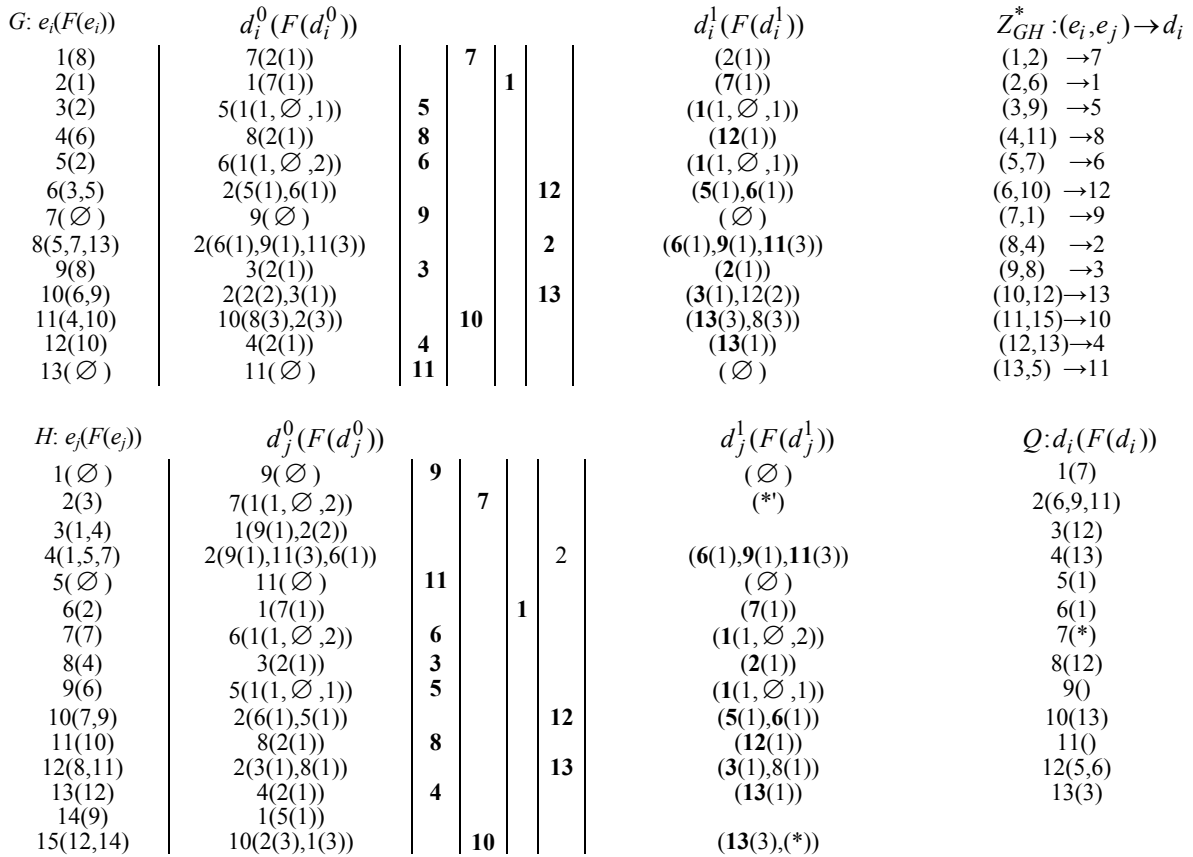


Рис. 3. Выделение общей части в графах G и H, приведенных на рис. 2

Поэтому состояния $D_G^1(F)$ и $D_H^1(F)$ соответствуют подстановке сходства Z_{GH}^* (на рис. 2 приведена справа вверху). Список инцидентов $\{d_i(F(d_i))\}$ для общей части $Q(G, H)$ с $m_Q = 13$ приведен справа внизу. Вершины общей части в графах G и H в изображениях вершин на рис. 2 указаны кодами d_i , а дуги, вошедшие в общую часть, отмечены жирным.

Заключение

В статье предложен метод решения задачи выделения общей части в версиях программной системы, представленных графовыми моделями (ГМ). Разработаны правила преобразования ГМ, представленных описаниями структур и списками атрибутов вершин и дуг, в стандартную форму в виде ориентированных графов, пригодную для применения взаимозависимой дифференциации вершин. Это позволило разработать алгоритм выделения общей части в ориентированных графах, который является инвариантным по отношению к особенностям описаний структур и набору атрибутов, используемых в сравниваемых ГМ.

Полученные результаты имеют важное значение для дальнейшего развития и расширения функций системы управления версиями. К ним можно отнести функции контроля исходного кода, оптимизации его структуры, визуального анализа фрагментов, иерархической структуризации исходного кода и получения временных оценок функционирования, разработки планов тестирования и ряд других функций по сопровождению разработки программ.

Литература

1. Власов А.И. Системный подход к проектированию при каскадной и итеративной модели жизненного цикла / А.И. Власов, А.А. Карлушин, Ю.М. Ганев // Тр. междунар. симпозиума «Надежность и качество». – 2015. – Т. 1. – С. 96–99.
2. Брагина Т.И. Сравнительный анализ итеративных моделей разработки программного обеспечения / Т.И. Брагина, Г.В. Табунчик // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2010. – № 2(23). – С. 130–138.
3. Бахтизин В.В. Модель жизненного цикла программных средств при разработке на основе гибких методов / В.В. Бахтизин, С.Н. Неборский // Доклады БГУИР. – 2008. – № 8(38). – С. 65–69.
4. Сиротенко Ф.Ф. Принципы работы и возможности системы управления версиями // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2010. – № 1. – С. 15–17.
5. Шурыгин В.Н. Системы контроля версий / В.Н. Шурыгин, Д.А. Сиваченко // Вестник МГУП. – 2015. – № 5. – С. 103–104.
6. Chacon S. Pro Git (2nd ed.) / S. Chacon, B. Straub. – Berkeley, CA, USA: Apress, 2014. – 456 p.
7. O'Sullivan B. Mercurial: The Definitive Guide. – O'Reilly Media, 2009. – 284 p.
8. Gold R. Control flow graphs and code coverage // Applied Mathematics and Computer Science. – 2010. – No. 4. – P. 739–749.
9. Feist M.D. Visualizing Project Evolution through Abstract Syntax Tree Analysis / M.D. Feist, E.A. Santos, I. Watts, A. Hindle // 2016 IEEE Working Conference on Software Visualization. – 2016. – P. 11–20.
10. Касьянов В.Н. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение / В.Н. Касьянов, В.А. Евстигнеев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 1104 с.
11. Pogrebnoy A.V. Constructing graph models for software system development and analysis // 2017 J. Phys.: Conf. Ser. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012118/pdf> (дата обращения: 03.10.2018).
12. Дэммер М. Новый функционал информативности для анализа структуры химических графов / М. Дэммер, Ф. Эммерт-Штрайб, Ю.Р. Цой, К. Вармуза // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2010. – Т. 316, № 5. – С. 5–11.
13. Dehmer M. Quantum Frontiers of Atoms and Molecules / M. Dehmer, F. Emmert-Streib, R.Y. Tsoy, K. Varmuza. – New York: Nova Publishing, 2011. – 673 p.
14. Погребной А.В. Метод определения сходства структур графов на основе выделения частичного изоморфизма в задачах геоинформатики // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2015. – Т. 326, № 11. – С. 56–66.
15. Land A.H. An Automatic Method of Solving Discrete Programming / A.H. Land, A.G. Doig // Problems Econometrica. – 1960. – Vol. 28, No. 3. – P. 497–520.

Погребной Андрей Владимирович

Аспирант инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР)
Томского политехнического университета (ТПУ)
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-808-36-82
Эл. почта: avpogrebnoy@gmail.com

Pogrebnoy A.V.

Finding common parts in software source code versions represented by graph models

Solving the problem of the objects structural similarity analysis based on graph models (GM) is one of the actual research directions of the applied graph theory. In the paper, program source code versions are used as objects for similarity analysis. Existing version control systems (VCS) work directly with the text of the program source code. Giving VCS an ability to work with GM, adequately representing program versions source code, opens new ways to improve traditional functions of the VCS and expand program development tools. It is proposed to base program versions similarity estimation on allocating biggest common part in the program source code. The aim of the study is to develop the method of the common part allocation if the program versions, represented as a GM. Research is based on the application of the graph vertices differentiation theory, where graph structure model is represented as a network of the state machines. Important method's advantage is an ability to easily adapt to program source code features. Method includes three stages – forming and encoding list of attributes of GM vertices and edges; transforming GM into standard form as a directed graph; allocating common part in two directed graphs, representing compared program versions. Algorithm of allocating common part is invariant relatively to GM description features and set of used attributes. Example of solving the problem of the common part allocation for two compared GM fragments is provided.

Keywords: software graph model, version control system, common part of two graphs, graph similarity substitution, graph nodes differentiation.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-49-56

References

1. Vlasov A.I., Karpunin A.A., Ganey Yu.M. Sistemnyy podkhod k proektirovaniyu pri kaskadnoy i iterativnoy modeli zhiznennogo tsikla. *Trudi Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo»*, 2015, vol. 1, pp. 96–99 (In Russ.).
2. Bragina T.I., Tabunshchik G.V. Sravnitelnyy analiz iterativnykh modeley razrabotki programmnogo obespecheniya. *Radioelektronika, informatika, upravlenie*, 2010, no. 2 (23), pp. 130–138 (In Russ.).
3. Bakhtizin V.V., Neborskiy S.N. Model zhiznennogo tsikla programmnikov sredstv pri razrabotke na osnove gibkikh metodov. *Doklady BGYuIR*, 2008, no. 8 (38), pp. 65–69 (In Russ.).
4. Sirotenko F.F. Principy raboty i vozmozhnosti sistem upravleniya versiyami. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli*, 2010, no. 1, pp. 15–17 (In Russ.).
5. Shurygin V.N., Sivachenko D.A. Sistemi kontrolya versiy. *Vestnik MGUP*, 2015, no. 5, pp. 103–104 (In Russ.).
6. Scott Chacon and Ben Straub. *Pro Git* (2nd ed.). Berkeley, CA, USA: Apress, 2014. 456 p.
7. Bryan O'Sullivan. *Mercurial: The Definitive Guide*. O'Reilly Media, 2009, 284 p.
8. Gold, Robert. Control flow graphs and code coverage. *Applied Mathematics and Computer Science*. 2010. No. 4, pp. 739–749.
9. Feist M.D., Santos E.A., Watts I., Hindle A. Visualizing Project Evolution through Abstract Syntax Tree Analysis. *2016 IEEE Working Conference on Software Visualization*, 2016, pp. 11–20.
10. Kasyanov V.N., Evstigneev V.A. *Grafi v programmirovanii: obrabotka, vizualizatsiya i primenenie*. SPb.: BKhV-Peterburg, 2003, 1104 p. (In Russ.).
11. Pogrebnoy A.V. Constructing graph models for software system development and analysis. *2017 J. Phys.: Conf. Ser.* Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012118/pdf> (accessed: October 3, 2018).
12. Demer M., Emmert-Shtraib F., Tsoy R.Yu., Varmuza K. Noviy funktsional informativnosti dlya analiza struktury khimicheskikh grafov. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no 5, pp. 5–11 (In Russ.).
13. Dehmer M., Emmert-Streib F., Tsoy R.Y., Varmuza K. *Quantum Frontiers of Atoms and Molecules*. New York, Nova Publishing, 2011, 673 p.
14. Pogrebnoy An.V. Metod opredeleniya skhodstva struktur grafov na osnove vydeleniya chastichnogo izomorfizma v zadachakh geoinformatiki. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 56–66 (In Russ.).
15. Land A.H., Doig A.G. An Automatic Method of Solving Discrete Programming. *Problems Econometrica*, Vol. 28, no. 3, 1960, pp. 497–520.

Andrey V. Pogrebnoy

PhD student, School of Computer Science & Robotics,
Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-808-36-82
Email: avpogrebnoy@gmail.com

УДК 004.932

А.А. Зеленский, М.М. Письменскова, В.В. Воронин

Алгоритм поиска изображений в виде хэш-функций на основе глубоких нейросетевых технологий

Представлен новый метод, основанный на выделении глобальных функций изображения и вычисления двоичных хэш-кодов. Данный подход обеспечивает пиксельное отображение изображения в хэш-пространство. В работе используется методология глубокого обучения для создания дескриптора со свойствами сохранения подобия и статистической независимости. Основным преимуществом данного подхода в отличие от существующих методов является возможность тонкой настройки поиска для специфических приложений, что позволяет получить более качественный результат поиска по сравнению с другими методами. Структура предложенного метода основана на использовании двух типов нейронных сетей: сверточные нейронные сети для описания изображения и автоэнкодера для отображения особенностей изображения в хэш-пространстве. Проведенные эксперименты показали эффективность при поиске изображений в большой базе данных в сравнении с другими известными методами.

Ключевые слова: контекстный поиск изображений, глубокая сверточная нейронная сеть, семантическое хэширование, автоэнкодер.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-57-62

Системы контекстного поиска изображений находят широкое применение в современном мире. Наиболее популярными являются поисковые запросы по изображению или по семантическому описанию. Такие подходы применяются в системах управления личными фотоколлекциями, поисковых системах для web-ресурсов, медицинских системах и др. Автоматический анализ больших немаркированных наборов изображений практически невозможен без эффективных алгоритмов поиска. Поиск изображений является одной из наиболее значимых проблем в компьютерном зрении и обработке изображений, которая стремительно набирает популярность из-за постоянно увеличивающегося объема фотографий и видео, получаемых ежедневно. Сложность задачи поиска обусловлена визуальной двусмысленностью естественных образов и семантическим разрывом между представлением изображения на основе функций и пониманием человека того, какие изображения похожи, а какие отличаются.

Основная трудность заключается в понимании, какие характеристики наиболее информативны для определения визуального сходства и построения дескриптора изображения. Несмотря на то, что существует большое количество исследований по этой теме, большинство разработанных дескрипторов предполагают использование Евклидовых и других аналогичных метрик для сравнения характеристик и извлечения наиболее близких изображений, что приводит к низкой эффективности работы метода. Альтернативный способ решения этой проблемы – использовать технологии хэширования данных. Это связано с проблемой сохранения подобия при отображении пространства признаков в компактное хэш-пространство.

В последние годы представлено много исследований, в которых сверточные нейронные сети, первоначально предназначенные для распознавания

образов и классификации изображений, используются для различных задач компьютерного зрения. В работе [1] сверточные нейронные сети используются для многоклассовой классификации, которые особенно эффективны для больших наборов данных изображений. На этапе обучения сверточная нейронная сеть изучает иерархию изображения. Как описано в [2], сверточная нейронная сеть способна представить изображение в виде информативного вектора, который описывает семантический смысл изображения таким образом, что в сочетании с соответствующей метрикой может обеспечить хорошие результаты поиска изображений [3].

Вектор функции, представляемый сверточной нейронной сетью, довольно велик, что накладывает ограничения на удобство использования в реальных информационно-поисковых системах, в частности путем привлечения вычислительно-интенсивных показателей, таких как Евклидова метрика, расстояние Кульбака–Лейблера и т.д. Другая сторона проблемы – это ограниченность вектор-функции, т.е. невозможность использовать всю свою описательную мощность для наборов данных разумного размера.

Цель данной работы – разработка алгоритма эффективного поиска изображений в пространстве хэш-функций на основе глубоких нейросетевых технологий.

Для достижения цели предлагается объединить сверточную нейронную сеть, обученную для описания содержимого изображения с помощью автоэнкодера, предназначенного для преобразования этого описания в хэш-значение. Это делается так, что аналогичные значения метрики Хэмминга связаны с изображениями, имеющими похожее семантическое значение.

На рис. 1 представлен способ получения дескриптора изображения на основе хэширования.

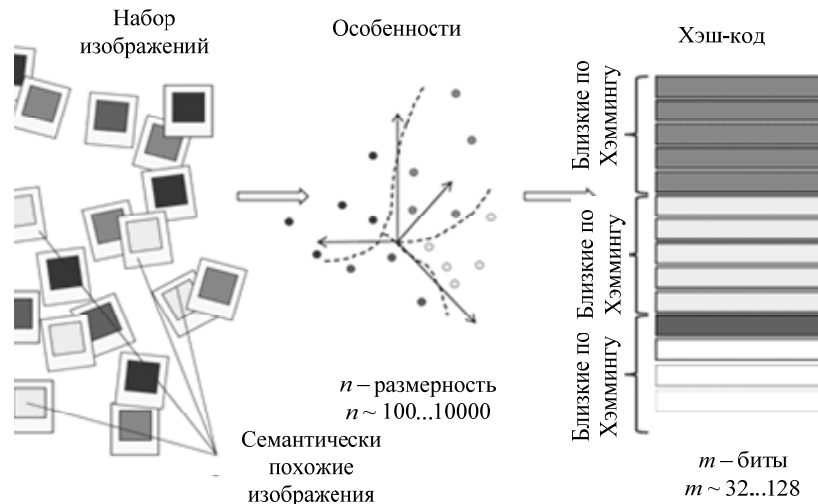


Рис. 1. Дескриптор изображения на основе хэш-функций

Текущее состояние проблемы

Существующие подходы обучения на основе хэш-функций для поиска изображений можно разделить на три категории: независимые от данных, зависящие от данных и основанные на обучении.

Подходы в первой категории не зависят от размеченных данных и могут рассматриваться как подходы «обучение без учителя» [4–7].

Для второй категории информация о попарных метках используется для изучения хэш-особенностей [8, 9].

Третья категория включает методы, использующие размеченный набор данных в целом для построения процедуры сопоставления [10].

Глубокое обучение нацелено на изучение иерархических особенностей изображений путем создания высокоуровневых особенностей из необработанных данных. Глубокое обучение достигло больших успехов в различных задачах компьютерного зрения, но достаточно небольшой прогресс был сделан в широкомасштабном визуальном поиске на основе хэширования. Семантическое хэширование – это первый подход, в котором для хэширования использовались глубокие методы обучения [11]. Для этой цели была использована сложная ограниченная машина Больцмана (RBM), обученная на создание компактных двоичных кодов. Однако эта модель сложна, требует предварительной подготовки и больших вычислительных мощностей, что ограничивает ее практическое применение. Несмотря на значительное количество литературы по этому вопросу, до сих пор нет надежного и простого в использовании подхода сопоставления изображения и его хэш-значения для использования в системах поиска изображений.

Бинарное хэширование и функция обучения

Для сравнения «схожести» объектов внутри выбранного класса предлагается получать хэши (компактные двоичные коды) для крупномасштабного визуального поиска, используя методы глубокого обучения. В отличие от существующих подходов обучения двоичных кодов разработана глубокая

нейронная сеть, которая позволяет связывать входное изображение с бинарным вектором по иерархии множественных нелинейных преобразований.

Разработка и обучение данной модели основываются на следующем наборе ограничений:

1. Потеря информации из-за процедуры сопоставления между исходным вектором признаков и вычисленным двоичным кодом должна быть минимизирована.

2. Биты в результирующем двоичном коде равномерно распределены.

3. Дифференциальные биты двоичного кода имеют почти нулевую корреляцию.

Нейронная сеть на основе автоэнкодера удовлетворяет условиям, описанным выше. Результирующая сеть схематически изображена на рис. 2.

Здесь $I \in \Omega \rightarrow \mathcal{R}$ – входное изображение, где Ω – открытое подмножество \mathcal{R}^2 и $h(I) \in \mathcal{H} = \{0,1\}^q$ – входное q -мерное хэш-значение, которое используется для поиска. Учитывая изображение запроса I_{query} и набор n -возможных изображений-кандидатов – $I_{\text{candidate}} = \{I_p\}$, $p=1..n$ используются функции, вычисленные сверточной нейронной сетью $f_{\text{cnn}} \in \mathcal{F} = [0,1]^{4096}$, чтобы идентифицировать топ-5 изображений, которые будут формировать набор кандидатов.

Пусть $f_{\text{cnn}}(I_{\text{query}})$ и $f_{\text{cnn}}(I_{\text{candidate}})$ являются векторами признаков изображения запроса I_{query} и I_p из набора кандидатов соответственно. Уровень подобия S между I_{query} и p -изображением из набора кандидатов $I_{\text{candidate}}$ определяется как евклидово расстояние между соответствующими векторами признаков,

$$s_i = f_{\text{cnn}}(I_{\text{query}}) - f_{\text{cnn}}(I_{\text{candidate}})_2. \quad (1)$$

Для упрощения процедуры обучения и дальнейшего улучшения производительности используется предварительно обученная сеть VGG-19 [12]. Для обучения нейронной сети выбран набор данных CIFAR-100 [11].

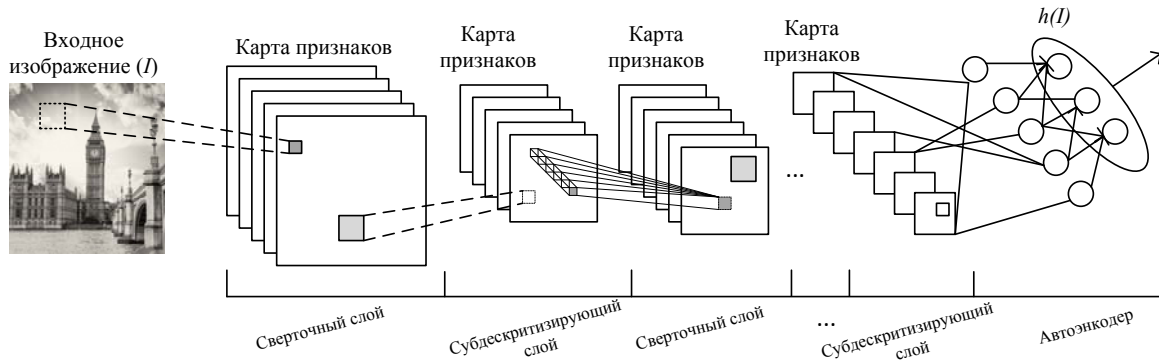


Рис. 2. Дескриптор изображения на основе хэширования

Целевая функция, используемая во время обучения, предназначена для обеспечения максимизации межклассовых вариаций и минимизации внутриклассовых особенностей при вычислении двоичных кодов. Сверточная нейронная сеть использует пространственно-локальную корреляцию, применяя локальный шаблон взаимодействия между нейронами соседних слоев. Кроме того, каждый фильтр нейронной сети реплицируется по всему визуальному полю. Эти реплицированные единицы используют одну и ту же параметризацию (вектор веса и смещение) и образуют карту признаков.

Сеть, с помощью которой вычисляется хэш изображения, состоит из сверточных слоев предобученной сети VGG-19, дескриптора, энкодера, представляющего собой перцептрон, и декодера, структура которого зеркальна структуре энкодера. Входом энкодера служат объединенные признаки сети и дескриптора. Задачей декодера является восстановление информации со входа энкодера. Особенностью автоэнкодера является то, что он сконструирован таким образом, чтобы не иметь возможность точно скопировать вход (в данном случае $f_{cnn}(I)$ на выходе. Это достигается за счет меньшего размером скрытого слоя, где и формируется двоичный хэш-код.

Чтобы обеспечить надежные результаты поиска изображений, необходимо построить правильную функцию потерь. Кроме того, совместное использование веса повышает эффективность обучения, значительно уменьшая количество изучаемых свободных параметров. Крупномасштабный поиск изображений на основе контента может быть организован как быстрая процедура поиска в хэш-таблице. В этом случае целью обучения является определение функции $\phi(f_{cnn}(I))$, которая проектирует 4096-размерный дескриптор изображения I в q -мерное двоичное хэш-пространство. Проецирование должно быть определено таким образом, чтобы элементы хэш-пространства \mathcal{H} , назначенные конкретному изображению, сохраняли семантическую согласованность между аналогичными изображениями по расстоянию Хэмминга. Для улучшения результатов на вход нейронной сети подаются данные с верхних слоев сверточной нейронной сети и хэш-код $h(I)$, который использует изображение-запрос I_{query} как входные данные.

В отличие от данной модели некоторые современные методы предназначены для представления хэш-функции $h(I)$ как линейной проекции представления изображения. Важная проблема заключается в том, что q -мерные двоичные метки могут представлять только 2^q разных точек данных. Поскольку число точек данных больше 2^q , многие точки будут отображаться в одну и ту же двоичную метку. Чтобы гарантировать, что точки данных с одной и той же двоичной меткой находятся рядом в пространстве функций, должно выполняться ограничение погрешности квантования:

$$E_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|x_i - C(x_i)\|, \quad (2)$$

здесь n – представляет количество обучающих данных; x_i – обучающий образец; $C(x_i)$ возвращает центр кластера x_i .

Во время обучения сети извлекаются функции изображения для размера партии n (256 в данном случае), набор извлеченных функций $F = \{f_{cnn}(I_i)\}$, $i = 1 \dots n$ и значение класса $\{l_i\}$, $i = 1 \dots n$. Автоэнкодер принимает в качестве входных данных $x \in \mathcal{F}$ и обучает параметры $W = \{\Theta, b\}$ (Θ – матрица размером $4096 \times q$ и b – смещение). Конечный хэш-код $\phi(f_{cnn}(I)) = h(f_{cnn}(I)) = \sigma(\Theta \times f_{cnn}(I) + b)$, где σ является сигмоидной функцией. Восстановление осуществляется следующим образом:

$$\psi(\hat{f}_{cnn}(I)) = \sigma(\Theta' h(f_{cnn}(I)) + b'); \quad (3)$$

$$\Theta' = \Theta^T, \quad b' = -b. \quad (4)$$

$$S(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_i \text{ и } x_j \text{ один класс;} \\ 1, & \text{если } x_i \text{ и } x_j \text{ разные классы.} \end{cases} \quad (5)$$

$$NLL = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^5 S(i, j). \quad (6)$$

Другими словами, автоэнкодер состоит из двух частей энкодер и декодер, которые могут быть определены переходами $h(f_{cnn}(I)): \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{H}$ и $h^{-1}(\hat{f}_{cnn}(I)): \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{F}$. Автоэнкодер обучается минимизировать ошибки восстановления (например, квадратичную ошибку).

$$\mathcal{L}(x, x') = \|x - x'\|^2 = \|x - \sigma(\Theta'(\sigma(\Theta x + b))) + b\|^2. \quad (7)$$

В данном случае

$$\|f_{\text{cnn}}(I) - h^{-1}(h(f_{\text{cnn}}(I)))\|^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Если пространство функций \mathcal{F} имеет меньшую размерность, чем входное пространство \mathcal{H} , то вектор функции $\phi(\cdot)$ можно рассматривать как сжатое представление входа $f_{\text{cnn}}(I)$. Если скрытые слои автоэнкодера больше входного слоя, то автокодер может потенциально изучить входную функцию и стать бесполезным. Однако экспериментальные результаты показали, что в этих случаях автоэнкодеры могут по-прежнему изучать полезные функции. Регуляризация L_1 и L_2 вводит дополнительную функцию потерь, наложение «штрафа» на определенные параметры. Формально если функцию потерь можно записать как

$$\mathcal{L}(W, F) = \sum_{i=0}^n \mathcal{L}(F_i, \psi(\phi(F_i))), \quad (9)$$

то регуляризованная функция потерь будет иметь вид

$$\mathcal{L}_{\text{рег}}(W, F) = NLL + \mathcal{L}(W, F) + \lambda \|W\|_p^p, \quad (10)$$

где

$$\|W\|_p = \left(\sum_{i=0}^{|W|} |W_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (11)$$

В этом выражении L_2 является нормой W . Параметр λ является гиперпараметром, который контролирует относительную значимость параметра регуляризации. Обычно используемые значения для p равны 1 и 2, следовательно, L_1/L_2 . Если $p=2$, такая регуляризация называется сокращением весов.

Добавление выражения регуляризации к потерям приводит к сглаживанию функций нейронной сети (путем присвоения «штрафов» за большие значения параметров, что уменьшает величину нелинейности). Более интуитивно, два параметра (NLL и $\lambda \|W\|_p^p$) соответствуют моделированию данных (NLL) и имеют «простое» и «гладкое» решение $\lambda \|W\|_p^p$.

Изучение оптимальных параметров модели предполагает минимизацию функции потерь. В случае многоклассовой классификации очень часто используют отрицательное логарифмическое правдоподобие как функцию потерь. Это эквивалентно максимизации вероятности \mathcal{P} набора данных F в модели, параметризованной W . Начнем сначала с определения вероятности \mathcal{P} :

$$\mathcal{P}(W = \{\Theta, b\}, F) = \prod_{i=0}^D \log(P(l = l_i | x_{(i)}, \Theta, b)). \quad (12)$$

Обучение нейронной сети осуществлялось в соответствии с рекомендациями Krizhevsky [1].

А именно, нейронная сеть обучается с использованием многокомпонентной логистической регрессии, мини-пакетного (mini-batch) градиентного спуска (на основе обратного распространения [13]) с импульсом. Размер пакета был установлен на 256, импульс 0,9. Обучение было регуляризовано сокращением весов (множитель штрафа L_2 установлен на 5).

Экспериментальные результаты

Для проведения экспериментов используется стандартная сеть VGG19 – сверточная нейронная сеть, которая содержит 19 слоев. Сеть состоит из чередующихся каскадов свертки и подвыборки. Сначала идут два каскада свертка-свертка-подвыборка, а затем три каскада свертка-свертка-свертка-подвыборка. Размер узла свертки во всех слоях 3×3 . При подвыборке производится выбор максимального значения (Max Pooling) из квадрата размером 2×2 .

Описанный подход сравнивался с несколькими современными методами на наборе данных CIFAR-100, который содержит 100 категорий объектов, и каждая категория состоит из 6000 изображений. Таким образом, всего 600000 изображений. Набор данных разделен на обучающие и тестовые наборы, 50000 и 10000 изображений соответственно. Процентное соотношение верхних пяти результатов представлено в таблице, был протестирован каждый подход на хэш-функциях длиной 32, 48, 64 и 128 бит.

Сравнение с известными методами (в %)

Длина хэш-функции (бит)	32	48	64	128
Предложенный метод	45,18	49,34	53,08	66,47
КМН [5]	32,12	33,29	35,78	60,43
Spherical [6]	24,11	30,77	34,75	49,48
SH [7]	27,32	25,72	24,10	56,29
PCAN [9]	28,15	24,85	21,47	56,56
LSH [14]	20,82	25,83	31,71	37,77
DH [15]	43,12	44,97	46,74	66,89
SPLH [16]	43,20	48,29	48,34	62,98

Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемый метод способен получать только семантическую информацию, что эффективно для небольших изменений цветовой и текстурной информации. На небольших наборах данных, метод не различает изображения с различной цветовой информацией, но схожим семантическим описанием. Извлечение функций сверточной нейронной сетью занимает около 60 миллисекунд (мс) на ПК с графическим процессором Geforce GTX 860M GPU и объемом памяти 4 Гб. Поиск осуществляется в режиме CPU, реализация на C/C++.

Вычисления Евклидовой метрики между двумя 4096-мерными векторами составляет 109,767 мс. Вычисление расстояния Хэмминга между двумя 128-битными двоичными кодами занимает 0,113 мс. Таким образом, предложенный подход к поиску изображений, основанный на хэшировании, в тысячу раз быстрее, чем традиционный поиск с 4096-мерными функциями.

Заключение и выводы

В статье представлен новый метод отображения изображений в пространство хэш-функций. Рассмотренный подход применен к задаче поиска изображений на основе семантической информации. Представлен алгоритм поиска изображений, объединяющий сверточную нейронную сеть и автоэнкодер. Экспериментальные результаты показали, что с помощью модификации глубоких сверточных нейронных сетей можно добиться значимого улучшения точности поиска изображений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-57-53192.

Литература

1. Krizhevsky A. Imagenet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton // *Advances in neural information processing systems*. – 2012. – P. 1097–1105.
2. On the performance of convnet features for place recognition / N. Sünderhauf, S. Shirazi, F. Dayoub, B. Upcroft, M. Milford // *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference*. – Hamburg: IEEE, 2015. – P. 4297–4304.
3. Neural codes for image retrieval / A. Babenko, A. Slesarev, A. Chigorin, V. Lempitsky // *European conference on computer vision*. – Cham: Springer, 2014. – P. 584–599.
4. Grauman K. Learning binary hash codes for large-scale image search / K. Grauman, R. Fergus // *Machine learning for computer vision*. – Berlin: Springer, 2013. – P. 49–87.
5. Learning hash codes with listwise supervision / J. Wang, W. Liu, A.X. Sun, Y.G. Jiang // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. – 2013. – P. 3032–3039.
6. Li X. Learning hash functions using column generation / X. Li, G. Lin, C. Shen, A.V.D. Hengel, A. Dick [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1303.0339.pdf>, свободный (дата обращения: 25.07.2018).
7. Li J. Fast image search with deep convolutional neural networks and efficient hashing codes / J.Y. Li, J.H. Li // *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2015 12th International Conference on*. – Zhangjiajie: IEEE, 2015. – P. 1285–1290.
8. Liong V.E. Deep hashing for compact binary codes learning / V.E. Liong, J. Lu, G. Wang, P. Moulin, J. Zhou // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. – 2015. – P. 2475–2483.
9. Asymmetric cyclical hashing for large scale image retrieval / Y. Lv, W.W. Ng, Z. Zeng, D.S. Yeung, P.P. Chan // *IEEE Transactions on Multimedia*. – 2015. – Vol. 17, No. 8. – P. 1225–1235.
10. Packing and padding: Coupled multi-index for accurate image retrieval / L. Zheng, S. Wang, Z. Liu, Q. Tian // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. – 2014. – P. 1939–1946.
11. Krizhevsky A. Learning multiple layers of features from tiny images / A. Krizhevsky, G. Hinton // *Technical report, University of Toronto*. – 2009. – Vol. 1, No. 4. – 60 p.
12. Going deeper with convolutions / C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, A. Rabinovich // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. – 2015. – P. 1–9.
13. Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding / Y. Jia, E. Shelhamer, J. Donahue, S. Karayev, J. Long, R. Girshick, S. Guadarrama, T. Darrell // *Proceedings*

of the 22nd ACM international conference on Multimedia. – Orlando: ACM, 2014. – P. 675–678.

14. Kulis B. Learning to hash with binary reconstructive embeddings / B. Kulis, T. Darrell // *Advances in neural information processing systems*. – 2009. – P. 1042–1050.

15. Lin K. Deep learning of binary hash codes for fast image retrieval / K. Lin, H.F. Yang, J.H. Hsiao, C.S. Chen // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops*. – 2015. – P. 27–35.

16. Zhao H. A fast binary encoding mechanism for approximate nearest neighbor search / H. Zhao, Z. Wang, P. Liu, B. Wu // *Neurocomputing*. – 2016. – Vol. 178. – P. 112–122.

Зеленский Александр Александрович

Канд. техн. наук, проректор по научной работе и научно-технической политике
Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»
Вадковский пер., д. 3а, г. Москва, Россия, 127055
Тел.: +7 (499) 972-95-21
Эл. почта: science@stankin.ru

Письменкова Марина Михайловна

Аспирант Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»
Вадковский пер., д. 3а, г. Москва, Россия, 127055
ORCID 0000-0001-9485-4696
Тел.: +7-928-814 68 51
Эл. почта: mpismenskova@mail.ru

Воронин Вячеслав Владимирович

Канд. техн. наук, инженер Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»
Вадковский пер., д. 3а, г. Москва, Россия, 127055
ORCID 0000-0001-8114-6383
Тел.: +7-988-534-34-59
Эл. почта: voronin_sl@mail.ru

Zelensky A.A., Pismenskova M.M., Voronin V.V.
Algorithm for image retravel in the space of hash functions based on the deep neural network technologies

This paper addresses the problem by novel technique for simultaneous learning of global image features and binary hash codes. Our approach provide mapping of pixel-based image representation to hash-value space simultaneously trying to save as much of semantic image content as possible. We use deep learning methodology to generate image description with properties of similarity preservation and statistical independence. The main advantage of our approach in contrast to existing is ability to fine-tune retrieval procedure for very specific application which allow us to provide better results in comparison to general techniques. The framework for data-dependent image presented in the paper hashing is based on use two different kinds of neural networks: convolutional neural networks for image description and autoencoder for feature to hash space mapping. Experimental results confirmed that our approach has shown promising results comparing to other state-of-the-art methods.

Keywords: content-based image retrieval, deep convolutional neural network, semantic hashing, autoencoder.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-57-62

References

1. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 2012, pp. 1097–1105.
2. Sünderhauf N., Shirazi S., Dayoub F., Upcroft B., Milford M. On the performance of convnet features for place recognition. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE / RSJ International Conference*, IEEE, 2015, pp. 4297–4304.
3. Babenko A., Slesarev A., Chigorin A., Lempitsky V. Neural codes for image retrieval. *European conference on computer vision*, Springer, 2014, pp. 584–599.
4. Grauman K., Fergus R. Learning binary hash codes for large-scale image search. *Machine learning for computer vision*. Berlin: Springer, 2013, pp. 49–87.
5. Wang J., Liu W., Sun A.X., Jiang Y.G. Learning hash codes with listwise supervision. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. 2013, pp. 3032–3039.
6. Li X., Lin G., Lin C., Shen C., Hengel A.V.D., Dick A. Learning hash functions using column generation [Electronic resource] Access mode: <https://arxiv.org/pdf/1303.0339.pdf>, free (accessed: 25 July 2018).
7. Li J., Li J.H. Fast image search with deep convolutional neural networks and efficient hashing codes. *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2015 12th International Conference on*, IEEE, 2015, pp. 1285–1290.
8. Erin Liang V., Lu J., Wang G., Moulin P., Zhou J. Deep hashing for compact binary codes learning. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, P. 2475–2483.
9. Lv Y., Ng W.W., Zeng Z., Yeung D.S., Chan P.P. Asymmetric cyclical hashing for large scale image retrieval. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2015, Vol. 17, no. 8, pp. 1225–1235.
10. Zheng L., Wang S., Liu Z., Tian Q. Packing and padding: Coupled multi-index for accurate image retrieval. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2014, P. 1939–1946.
11. Krizhevsky A., Hinton G. Learning multiple layers of features from tiny images – Technical report, University of Toronto, 2009, Vol. 1, № 4, 60 p.
12. Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Rabinovich A. Going deeper with convolutions. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 1–9.
13. Jia Y., Shelhamer E., Donahue J., Karayev S., Long J., Girshick R., Darrell T. Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding. *Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia*, ACM, 2014, pp. 675–678.
14. Kulis B., Darrell T. Learning to hash with binary reconstructive embeddings. *Advances in neural information processing systems*, 2009, pp. 1042–1050.
15. Lin K., Yang H.F., Hsiao J.H., Chen C.S. Deep learning of binary hash codes for fast image retrieval. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops*, 2015, pp. 27–35.
16. Zhao H., Wang Z., Liu P., Wu B. A fast binary encoding mechanism for approximate nearest neighbor search. *Neurocomputing*, 2016, Vol. 178, pp. 112–122.

Alexander A. Zelensky

Ph.D. in Engineering Science, Vice rector for Research Work and R&D Politics, Moscow State Technological University «STANKIN»
3a, Vadkovsky Lane, Moscow, Russia, 127055
Phone: +7 (499) 972-95-21
Email: science@stankin.ru

Marina M. Pismenskova

Post-graduate student, Moscow State Technological University «STANKIN»
3a, Vadkovsky Lane, Moscow, Russia, 127055
ORCID 0000-0001-9485-4696
Phone.: +7-928-814-68-51
Email: mpismenskova@mail.ru

Viacheslav V. Voronin

Ph.D. in Engineering Science, Moscow State Technological University «STANKIN»
3a, Vadkovsky Lane, Moscow, Russia, 127055
ORCID 0000-0001-8114-6383
Phone: +7-988-534-34-59
Email: voronin_sl@mail.ru

А.А. Зеленский, Е.А. Семенищев, В.А. Франц

Алгоритм определения формы объектов по анализу изображений, полученных в инфракрасном диапазоне

Рассматриваются алгоритмы предварительной обработки изображений, полученных в инфракрасном диапазоне, и восстановления контуров объектов. Применение данных подходов позволяет получить примерное представление о форме объектов в условиях отсутствия информации, получаемой в оптическом диапазоне. В качестве подходов первичной обработки изображений применяются следующие алгоритмы: фильтрация и размытие изображения; пороговая бинаризация; детектирование границ температурных изменений. Алгоритм фильтрации и размытия изображения основан на многокритериальном методе. Алгоритм пороговой бинаризации основан на пороговой обработке. Алгоритм нахождения границы объекта основан на применении математического подхода для нахождения эквидистантной кривой. В статье представлены блок-схемы алгоритмов и их математическое описание. Эффективность предлагаемого подхода показана на наборе тестовых изображений для решения задачи поиска формы объектов по анализу данных, полученных в инфракрасном диапазоне.

Ключевые слова: тепловизионные изображения, фильтрация, эквидистантная кривая, инфракрасный диапазон, детектор границ.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-63-68

Современные системы контроля и управления используют в дополнение к обычным датчикам информацию, получаемую с выходов фоточувствительных матриц. Анализ данных, полученных камерами, работающими в оптическом диапазоне, помогает оператору роботизированного комплекса повысить эффективность выполнения различных операций. В автоматизированных системах, основанных на анализе данных получаемых в виде изображений, можно осуществить полное или частичное исключение участия человека в обычных и монотонных операциях. В качестве дополнительных данных может быть использована информация, полученная в диапазонах, не видимых человеком. Такими данными могут быть изображения, полученные в ультрафиолетовом диапазоне, позволяющие видеть статические разряды и специализированные метки. Ближний инфракрасный диапазон позволяет видеть в условиях тумана и отсутствия источника света. Рентгеновский диапазон позволяет проникать в объект. Сверхвысокочастотный диапазон позволяет видеть дисперсию от поверхностного слоя объектов с плотной структурой. Дальний инфракрасный спектр позволяет видеть температурный градиент объектов, находящихся в кадре.

В работе рассматривается анализ изображений, полученных в дальнем инфракрасном спектре и характеризующих температурный градиент объектов. Изображение, полученное тепловизионной камерой, сильно отличается от обычного изображения, полученного в видимом диапазоне. Границы объектов в этих диапазонах часто не совпадают. Наряду с этим трудно отличить четкую границу между двумя связанными объектами в инфракрасном спектре.

Решение задачи поиска границ объектов на изображениях, полученных в ИК-спектре, является обратной задачей, которая предполагает наличие предварительной информации о формировании модели воздействий на него. Для эффективного выполнения операции восстановления, модель должна включать

в себя все виды искажений. Примером таких воздействий могут служить искажения, вызванные атмосферной турбулентностью, изменение оптических и электронных компонентов фиксации, относительное перемещение объектов перед камерой, расфокусировка камеры и т.д.

Наличие шумовой составляющей на изображении затрудняет его восприятие и делает невозможным использование автоматизированных систем. Шумовая составляющая наиболее заметна оператору на однотонных участках изображения. Большинство разработанных методов обработки изображений являются математически сложными с большим количеством начальных и расчётных условий [1, 2], в ряде случаев требующих присутствия оператора. Проблемы первичной обработки изображений, полученных в инфракрасном спектре, рассмотрены в работах [3, 4]. Однако они не учитывают интегрированный подход, который также позволяет выполнить попытку восстановления формы объектов.

Существует большая группа алгоритмов восстановления размытия изображений, основанных на алгоритмах деконволюции [1, 5]. Эти относительно простые подходы позволяют восстановить исходное изображение, если известна функция размытия (траектория смаза). Примером таких работ могут выступать подходы, предложенные в работах [3, 4]. В них рассматривается проблема устранения размытия изображений, которая является эффективной для восстановления в видимом диапазоне, что является неприменимым для изображений, полученных в инфракрасном спектре. Применение этих алгоритмов (таких, как метод Канни, HOG- или LOG-детекторы и др. [6–8]) на тепловизионных изображениях определяет не единичную границу, а множественные структуры границ. Наряду с этим образуется множество побочных элементов, не относящихся к границам объектов. Чаще всего границы не являются замкнутыми, что осложняет последующую обработку.

В связи с этим в работе рассматривается метод, который позволяет выполнять предварительную обработку изображений и восстанавливать форму объектов, полученных в инфракрасном диапазоне. В качестве тестовых изображений используются фотографии трёх объектов (стальная труба, стальная гайка и блок электроники в пластиковом корпусе), нагретых до температуры 31 °С, температура окружающей среды составляет 24 °С. Фотография этих объектов показана на рис. 1.

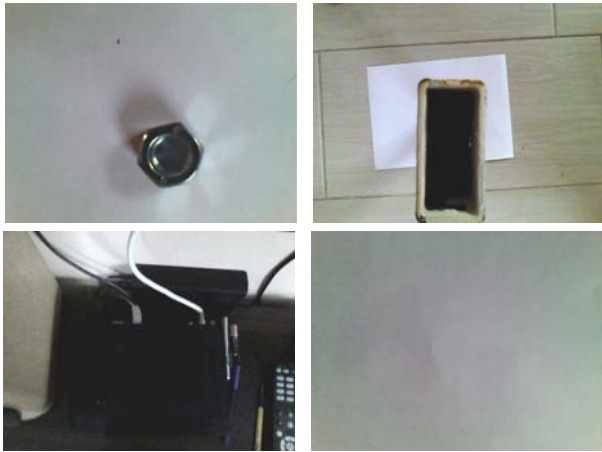


Рис. 1. Тестовые изображения

Изображения получены с использованием камеры FLIR C2 и имеют оптическое разрешение в видимом диапазоне 800×600 точек и инфракрасном 80×60 точек. Во время эксперимента объекты были покрыты листом бумаги, что не позволило использовать методы, основанные на анализе изображений, работающие в видимом диапазоне.

Многокритериальный метод фильтрации изображений

Упрощённая математическая модель цифровых изображений может быть представлена в виде [9]

$$Y_{i,j} = S_{i,j} + \eta_{i,j}, \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m,$$

где $Y_{i,j}$ – двумерный цифровой сигнал (изображение); $S_{i,j}$ – полезная составляющая, неискажённое изображение; $\eta_{i,j}$ – аддитивная шумовая компонента.

Изображения инфракрасного диапазона подвержены воздействию гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием $\eta(0, \sigma_{\text{noise}})$ и дисперсией σ_{noise} . Сложной является решение задачи уменьшения действия данного компонента в условиях отсутствия информации о сигнале (изображении) и шуме. Эти ограничения не позволяют использовать классические методы или требуют дополнительной настройки оператором [10].

Для обработки двумерных цифровых сигналов (изображений) в работе используется метод, основанный на одновременной минимизации L2 нормы $\sum_{i,j} (\bar{s}_{i,j} - s_{i,j})^2$ и квадрата разности первого порядка строк $\sum_{i,j} (\bar{s}_{i,j} - \bar{s}_{i,j-1})^2$ и столбцов $\sum_{i,j} (\bar{s}_{i,j} - \bar{s}_{i-1,j})^2$.

Предложенный в работе метод имеет форму целевой функции:

$$\begin{aligned} \varphi(\bar{s}_{0,0}, \bar{s}_{0,1}, \dots, \bar{s}_{0,n}, \bar{s}_{1,0}, \bar{s}_{1,1}, \bar{s}_{1,n}, \dots, \bar{s}_{m,0}, \bar{s}_{m,1}, \dots, \bar{s}_{m,n}) = \\ = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (\bar{s}_{i,j} - s_{i,j})^2 + \\ + \lambda \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n (\bar{s}_{i,j} - \bar{s}_{i-1,j})^2 + \mu \sum_{i=0}^m \sum_{j=1}^n (\bar{s}_{i,j} - \bar{s}_{i,j-1})^2, \end{aligned}$$

где λ, μ – положительные весовые коэффициенты.

Для краткости будем использовать обозначение $\bar{s} = (\bar{s}_{i,j})_{i=0}^m, j=0}^n$, $s = (s_{i,j})_{i=0}^m, j=0}^n$, $d\bar{s} = (d\bar{s}_{i,j})_{i=0}^m, j=0}^n$; для

любого $\bar{s} \in R^{(m+1)(n+1)}$, $\|\bar{s}\| = \sqrt{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \bar{s}_{i,j}^2}$ – норма величины \bar{s} .

$$\begin{aligned} \bar{s}_{i,j}^{k+1} = (1 - 2 \cdot \alpha \cdot c_{i,j}) \bar{s}_{i,j}^k + \\ + 2 \cdot \alpha \cdot \left(s_{i,j} + \lambda (\bar{s}_{i-1,j}^k + \bar{s}_{i+1,j}^k) + \mu (\bar{s}_{i,j-1}^k + \bar{s}_{i,j+1}^k) \right), \\ i=0, 1, \dots, m; \quad j=0, 1, \dots, n; \quad k=0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Представленное выражение позволяет определить значения оценок для целевой функции. Доказательство сходимости подробно рассматривается в работе [11]. Для применения метода уменьшения действия шумовой составляющей с использованием многокритериального метода в работе предложен алгоритм, представленный на рис. 2.

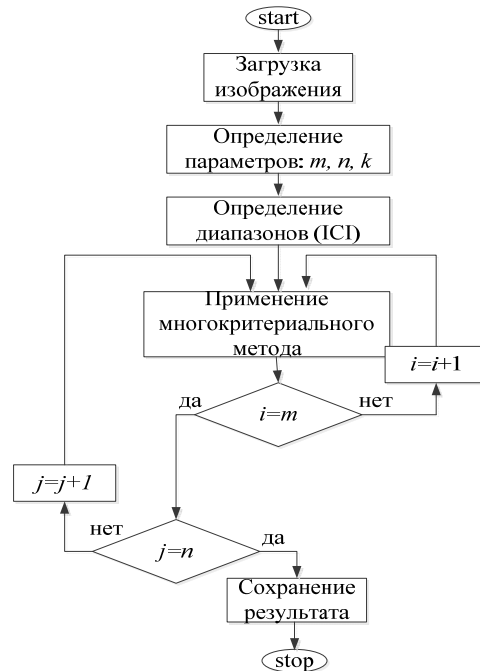


Рис. 2. Алгоритм метода фильтрации изображений

Представленный на рис. 2 алгоритм работает следующим образом:

1. Загрузка изображения.
2. На втором этапе определяются параметры изображения: количество строк m , столбцов n и повторений k .

3. Определение областей стационарности, основанных на применении алгоритма ICI [12].

4. Подавление шумовой составляющей. Для завершения этого шага мы используем приведенное выше выражение. Параметры выбираются в соответствии с рекомендациями, представленными в работе [11], $\lambda, \mu = 0,13$. Для устранения шумовой компоненты на границах объектов [13] $\lambda, \mu = 4,44$.

5. Проверка условия достижения конца всего изображения $i = m$ и $j = n$.

6. На заключительном этапе производится сохранение результата.

На рис. 3 представлен пример уменьшения действия шумовой составляющей на инфракрасном изображении.

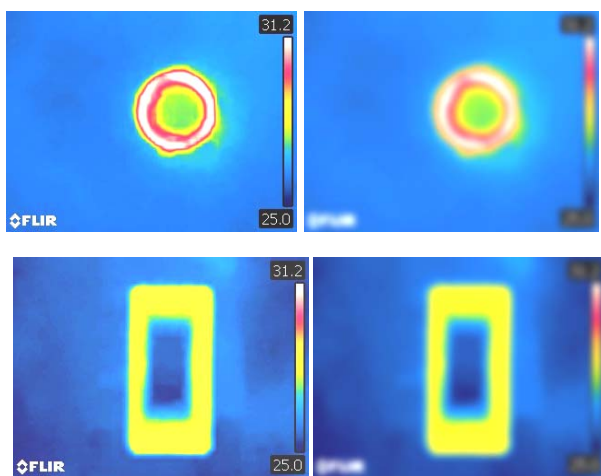


Рис. 3. Пример работы алгоритма уменьшения действия шумовой компоненты

Анализ результатов, представленных на рис. 3, показывает, что предложенный алгоритм позволяет уменьшать действия шумовой компоненты и размытие объектов для изображений, полученных в инфракрасном диапазоне.

Алгоритм поиска границ

Выполнение операции восстановления контуров объектов, полученных в инфракрасном диапазоне, осуществляется на основе комбинированного подхода. Для работы алгоритма необходимо получить маску объекта. Получение маски позволяет автоматически выполнять поиск границы. Алгоритм представлен на рис. 4. Алгоритм работает следующим образом:

1. Загрузка или захват изображения.
2. Нормализация изображения относительного изменения температур.
3. Определение нижнего и верхнего пределов фиксации температурного градиента:
 - установка верхней и нижней границы вручную;
 - нормализованный градиент делится на 3 диапазона. Предположим, что нижний уровень является максимумом нижней границы. Верхний уровень – это минимум верхней границы.
4. Построение маски градиента. Указанный оператором или автоматически найденный диапазон

бинаризуется. Результатом бинаризации является маска температурного градиента, результаты которой будут использованы для восстановления.

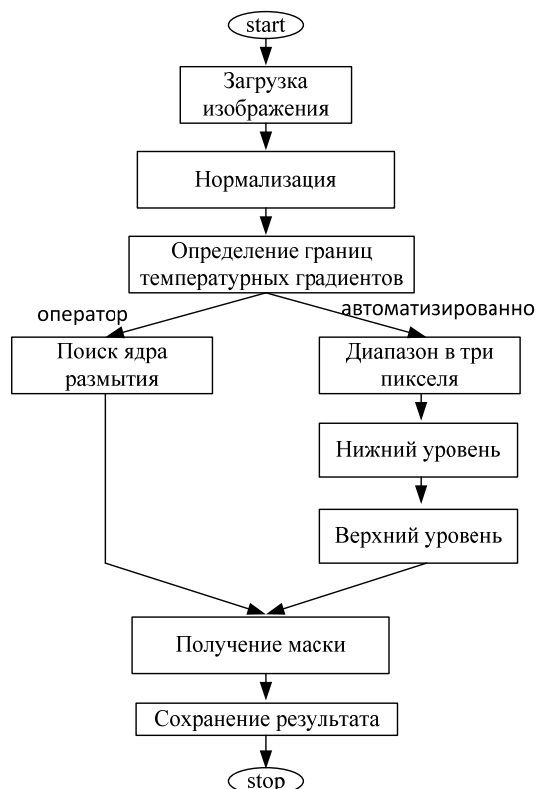


Рис. 4. Алгоритм для нахождения границ областей температурных изменений

В этой статье мы использовали автоматическую настройку параметров с нормализованным градиентом, разделенным на 3 диапазона.

Пример работы алгоритма представлен на рис. 5.



Рис. 5. Пример работы алгоритма нахождения границ областей температурных изменений

Анализ результатов, представленных на рис. 5, показал, что, предложенный алгоритм позволяет выделить границы градиентов в диапазоне заданных температурных градиентов.

Алгоритм поиска эквидистантной кривой

Чаще всего фиксируемые в ИК-диапазонах изображения на практике имеют размытие. Размытие возникает из-за применения матрицы с низким разрешением и характера физического процесса. В большинстве случаев это размытие представляется ядром Гаусса. Для восстановления могут быть использованы методы поиска активных контуров [14] или метод поиска эквидистантной кривой, рассмотренные в работе [15]. На рис. 6 показан алгоритм поиска эквидистантной кривой.



Рис. 6. Алгоритм поиска эквидистантной кривой

Представленный на рис. 5 алгоритм работает следующим образом:

1. Загрузка или захват изображения.
2. Загрузка данных о параметрах объектива и расстоянии до точки фокусировки.
3. Выполнение операции удаления размытия. Операция выполняется шаг за шагом. В качестве алгоритма восстановления используется подход, приведённый на рис. 4. Критерием остановки является выполнение требований минимальной ширины пикселей в границах (n) для максимального количества объектов (k).
4. На четвёртом этапе производится бинаризация. Операция необходима для определения количества разнесённых объектов, представленных на изображении.
5. Расчет количества отдельных объектов на изображениях (n). Операция выполняется с использованием дерева поиска.
6. Определяется ширина границы объектов. На этом этапе вычисляется граница размытия. Определение области размытия производится с использованием пороговой обработки. Поиск средней линии осуществляется между максимальной и минимальной яркостью.

7. Проверка выполнения условия наибольшего числа объектов с минимальной границей. Если условие не выполняется, производится возврат к шагу 3.

Экспериментальные результаты

На рис. 7 показаны примеры восстановления контуров объектов, полученных на основе анализа изображений, полученных в инфракрасном диапазоне. Тестовые изображения получают с помощью тепловой камеры и последующей оцифровки данных. На рис. 7 представлены примеры для изображений, приведённых на рис. 1. В качестве тестовых объектов выступают профильная труба, гайка и тело изолированного устройства.

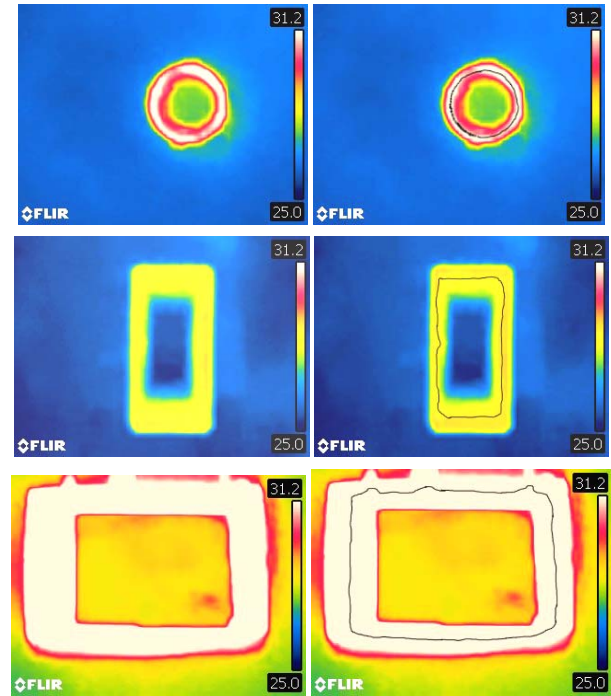


Рис. 7. Результаты работы алгоритма

Анализ результатов, представленных на рис. 7 показывает, что применение алгоритма позволяет определить форму объектов по изображениям, полученным в инфракрасном диапазоне. В качестве недостатка предложенного подхода следует отметить невозможность выделения внешней и внутренней границы объектов, а также необходимость масштабирования полученного результата.

Заключение

В ходе выполнения работы предложен алгоритм определения формы объектов на тепловизионных изображениях. Алгоритм выполняет обработку без анализа данных в видимом диапазоне. На наборе тестовых данных показана эффективность представленного алгоритма для анализа единичного объекта простой формы. В качестве выявленных недостатков следует выделить неспособность алгоритма отличать внутреннюю и внешнюю границы объектов, невозможность обработки объектов с шириной границы менее трёх пикселей, а также слияние форм объектов в случае пересечения их тепловых градиентов.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках Федеральной программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям научно-технического комплекса Российской Федерации в 2014–2020 годах» (контракт № 14.577.21.0212 (RFMEFI57716X0212)).

Литература

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Image denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering / K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, K. Egiazarian // IEEE Trans. Image Process. – 2007. – Vol. 16, No. 8. – P. 2080–2095.

3. Everitt J.H. A three-camera multispectral digital video imaging system / J.H. Everitt, D.E. Escobar, I. Cavazos, J.R. Noriega, M.R. Davis // *Remote sensing of environment*. – 1995. – P. 333–337.
4. Lloyd J.M. *Thermal imaging systems* – Springer Science & Business Media, 2013. – 455 p.
5. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
6. Canny J. A Computational Approach To Edge Detection // *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1986. – No. 8(6). – P. 679–698.
7. Tomasi C. Histograms of oriented gradients // *Computer Vision Sampler*. – 2012. – P. 1–6.
8. Yasmin J.H.J. Robust segmentation algorithm using LOG edge detector for effective border detection of noisy skin lesions / J.H.J. Yasmin, M.M. Sathik, S.Z. Beevi // *Computer, Communication and Electrical Technology (ICCET)*. – IEEE, 2011. – P. 60–65.
9. Марчук В.И. Обработка черно-белых изображений на основе двухмерного метода размножения оценок полезной составляющей / В.И. Марчук, В.В. Воронин // *Изв. Юж. фед. ун-та. Технические науки*. – 2008. – Т. 80, № 3. – С. 131–137.
10. Марчук В.И. Сравнительный анализ результатов восстановления изображений двумерным методом размножения оценок и его модификаций / В.И. Марчук, В.В. Воронин, А.И. Шерстобитов // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2010. – Т. 6, № 1. – С. 26–34.
11. Semenishchev E. Image denoising using a combined criterion / E. Semenishchev, V. Marchuk, I. Shraifel, V. Dubovskov, T. Onoyko, S. Maslennikov // *Mobile Multimedia / Image Processing, Security, and Applications*. – 2016. – Vol. 9869. – <https://doi.org/10.1117/12.2223610>
12. Katkovnik V. Local approximation techniques in signal and image processing / V. Katkovnik, K. Egiazarian, J. Astola. – Bellingham: SPIE, 2006. – Vol. PM157. – P. 576.
13. Семенищев Е.А. Многокритериальный метод сглаживания двумерных сигналов в условиях ограниченного объема априорной информации / Е.А. Семенищев, И.С. Шрайфель, В.И. Марчук, И.А. Торопов // *Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника*. – 2012. – № 6. – С. 35–39.
14. Kass M. Snakes: Active contour models / M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos. – *International Journal of Computer Vision*. – 1988. – Vol. 1, iss. 4. – P. 321–331.
15. Computation of equidistant curve for the image with blurred contours / S.E. Semenishchev, I. Shraifel, V. Voronin, E. Epishina // *Electronic Imaging*. – 2017. – P. 90–96.

Зеленский Александр Александрович

Канд. техн. наук, проректор по научной работе и научно-технической политике Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»
Вадковский пер., д. 3а, г. Москва, Россия, 127055
Тел.: +7 (499) 972-95-21
Эл. почта: science@stankin.ru

Семенищев Евгений Александрович

Канд. техн. наук., инженер Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»
Вадковский пер., д. 3а, г. Москва, Россия, 127055
Тел.: +7-918-544-99-90
Эл. почта: sea.sea@mail.ru

Франц Владимир Александрович

Аспирант Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»
Вадковский пер., д. 3а, г. Москва, Россия, 127055
Тел.: +7-928-172-31-56
Эл. почта: degobyt@gmail.com

Zelensky A.A., Semenishchev E.A., Franc V.A.

Algorithm to find the shape of objects from the analysis of data obtained in the infrared range

In this paper, we consider algorithms for preprocessing images obtained in the infrared range and reconstructing the contours of objects. The application of these approaches provides an approximate idea of the form of objects, in the absence of information obtained in the optical range. As the approaches used for primary data processing, the following algorithms are used: filtering and blurring the image; threshold binarization; detection of the boundaries of temperature changes. The algorithm for filtering and blurring the image is based on a multicriteria method. The algorithm of threshold binarization is based on threshold processing. The algorithm to find the boundary of an object is based on the application of a mathematical approach for finding an equidistant curve. The article presents block diagrams of algorithms and their mathematical description. The set of test images shows the effectiveness of the proposed approach used to find the shape of objects from the analysis of data obtained in the infrared range.

Keywords: thermal imaging, filtering, equidistant curve, infrared, border detector.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-63-68

References

1. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. Moscow, Technosphere, 2005. 1072 p. (In Russ.)
2. Dabov K., Foi A., Katkovnik V., Egiazarian K. Image denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering. *IEEE Trans. Image Process*, 2007, vol. 16, no. 8, pp. 2080–2095.
3. Everitt J.H., Escobar D.E., Cavazos I., Noriega J.R., Davis M.R. A three-camera multispectral digital video imaging system. *Remote sensing of environment*, 1995, pp. 333–337.
4. Lloyd J.M. *Thermal imaging systems*. Springer Science & Business Media, 2013, 455 p.
5. Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. Digital image processing using MATLAB. *Upper Saddle River, New Jersey, Pearson-Prentice-Hall*, 2004, vol. 624, 616 p.
6. Canny J. A Computational Approach To Edge Detection. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, no. 8(6), pp. 679–698.
7. Tomasi C. Histograms of oriented gradients. *Computer Vision Sample*, 2012, pp. 1–6.
8. Yasmin J.H.J., Sathik M.M., Beevi S.Z. Robust segmentation algorithm using LOG edge detector for effective border detection of noisy skin lesions *Computer, Communication and Electrical Technology (ICCET), 2011 International Conference on. IEEE*, 2011, pp. 60–65.
9. Marchuk V.I., Voronin V.V. Processing black-and-white images based on the two-dimensional method of reproduction of estimates of the useful component *News of the Southern Federal University. Technical science*, 2008, vol. 80, № 3, pp. 131–137 (In Russ.).
10. Marchuk V.I., Voronin V.V., Sherstobitov A.I. Comparative analysis of the results of image restoration by the two-dimensional method of reproduction of estimates and its

modifications *Electrotechnical and Informational Complexes and System*, 2010, vol. 6., no. 1, pp. 26–34 (In Russ.).

11. Semenishchev E., Marchuk V., Shraifel I., Dubovskov V., Onoyko T., Maslennikov S. Image denoising using a combined criterion. *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications*, 2016, vol. 9869. <https://doi.org/10.1117/12.2223610>

12. Katkovnik V., Egiazarian K., Astola J. Local approximation techniques in signal and image processing, *Bellingham SPIE*, 2006, Vol. PM157, 576 p.

13. Semenishchev E.A., Schreifel I.S., Marchuk V.I., Toropov I.A. A multi-criteria method of smoothing two-dimensional signals in conditions of limited amount of a priori information *Successes of modern radio electronics*, 2012, № 6, pp. 35–39 (In Russ.).

14. Kass M., Witkin A., Terzopoulos D. Snakes: Active contour models. *International Journal of Computer Vision*, 1988, vol. 1, iss. 4, pp. 321–331.

15. Semenishchev S.E., Shraifel I., Voronin, V., Epishina E. Computation of equidistant curve for the image with blurred contours. *Electronic Imaging*, 2017, pp. 90–96.

Alexander A. Zelensky

Ph. D. in Engineering Science, Vice Rector for Research Work and R&D Politics, Moscow State Technological University «STANKIN» 3a, Vadkovsky Lane, Moscow, Russia, 127055
Phone: +7 (499) 972-95-21
Email: science@stankin.ru

Evgenii A. Semenishchev

Ph.D. in Engineering Science, Moscow State Technological University «STANKIN» 3a, Vadkovsky Lane, Moscow, Russia, 127055
Phone: +7-918-544-99-90
Email: sea.sea@mail.ru

Vladimir A. Franc

Post-graduate student, Moscow State Technological University «STANKIN» 3a, Vadkovsky Lane, Moscow, Russia, 127055
Phone: +7-928-814-68-51
Email: degobyt@gmail.com

УДК 621.396.41

Е.Б. Грибанова, И.Н. Логвин, И.В. Ширенков

Алгоритм оценки маркетинговых мероприятий онлайн-социальной сети «ВКонтакте» на основе каскадной модели распространения информации

Предложен алгоритм оценки показателя влияния маркетингового мероприятия в социальной сети «ВКонтакте» на основе каскадной модели распространения информации. Его реализация включает загрузку данных из социальной сети, моделирование распространения информации и решение оптимизационной задачи. В качестве примера рассмотрена оценка показателя влияния конкурса, проводимого в группе социальной сети.

Ключевые слова: социальная сеть, конкурс, каскадная модель, распространение информации, влияние.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-69-74

В настоящее время в рамках Интернета возникают и растут сообщества пользователей, образующих онлайн-социальные сети. При этом всё больше компаний воспринимают социальные сети как партнёров по бизнесу, так как их можно использовать не только как корпоративный мессенджер, но и для продвижения своих товаров и услуг с целью привлечения потенциальных клиентов и увеличения продаж [1–3]. Среди наиболее популярных методов продвижения можно отметить проведение конкурса, покупку рекламы у сторонних групп (сообществ с большой аудиторией) или покупку рекламы у администраторов социальной сети [4]. Эффективность маркетингового мероприятия определяется количеством пользователей, получивших информацию о деятельности компании. В связи с этим моделирование степени распространения информации и оценка показателей влияния являются актуальной задачей.

Данная работа посвящена моделированию распространения информации в социальной сети «ВКонтакте» и оценке показателя влияния маркетинговых мероприятий. В качестве маркетингового мероприятия было рассмотрено проведение конкурсов в группах социальной сети, целью которых являются распространение среди пользователей информации о своей деятельности, а также повышение лояльности участников группы. Для участия в таких конкурсах пользователи социальной сети должны вступить в сообщество и разместить на своей странице информацию о рекламном мероприятии, сделав репост (оригинальное сообщение называется постом, а скопированное у другого участника – репостом). После окончания срока проведения конкурса происходит выбор победителя (победителей) заявленного приза. Популярность конкурсов обусловлена простотой их реализации для организаторов, так как они строятся на существующих технических возможностях социальных сетей, а затраты на их проведение связаны только со стоимостью заявленного приза. В свою очередь для пользователей участие в конкурсе не требует усилий и затрат времени.

О результатах маркетингового мероприятия позволяет судить в том об числе увеличении числа подписчиков группы [5].

Результаты опроса

В ходе исследования был проведен опрос пользователей социальной сети «ВКонтакте», в котором приняло участие 158 респондентов. С помощью инструмента Google формы пользователям было предложено оценить влияние на их участие в конкурсе по десятибалльной шкале каждого из четырех факторов: стоимость разыгрываемого приза, необходимость разыгрываемого приза, количество выигрышных позиций, участие в розыгрыше друзей. Медианные значения полученных величин представлены на рис. 1. Таким образом, наибольшая оценка была присвоена показателям «необходимость разыгрываемого приза для человека» и его «стоимость». При этом участие в розыгрыше друзей оказывает наименьшее влияние на пользователя. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что участие в конкурсе пользователей определяется характеристиками самого маркетингового мероприятия.

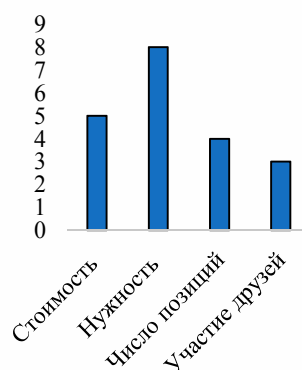


Рис. 1. Медианные значения важности показателей

Модели распространения информации

Существуют две основные модели распространения информации в сети: независимая каскадная и линейная пороговая [5–7]. Процесс распространения представлен в виде последовательности шагов, на которых выполняется активирование вершин, заключающееся в изменении их статуса с неактивного на активный (активный статус подразумевает передачу информации связанным вершинам). При активации происходит сравнение двух показателей: порогового значения T_i , устанавливаемого для каж-

дой вершины, и вероятности влияния p , которая определяется для связывающих узлов ребер. Независимая каскадная модель основана на переборе активированных на предыдущем шаге узлов, каждый из которых может активировать неактивного соседа с вероятностью влияния $p \in [0;1]$. При успешной активации статус вершины меняется с неактивного на активный. В линейной пороговой модели осуществляется перебор неактивных узлов, которые на очередном шаге могут быть активированы активными узлами сети. Влияние активных узлов выражается суммой вероятностей влияния. Если данная сумма превышает пороговое значение вершины, статус узла u изменяется с неактивного на активный.

Среди существующих работ по моделированию распространения информации и оценке показателей влияния можно отметить следующие.

В источнике [8] приведены алгоритмы, имитирующие обход графа с помощью каскадной и линейной пороговой модели. Данные алгоритмы носят наименование C-Loop, T-Loop и E-Loop. В первом алгоритме выполняется перебор активных узлов, во втором – неактивных узлов, а в третьем – ребер графа.

Авторами [9] предложена IC-N модель, или каскадная модель с негативными мнениями. Узлы графа данной модели характеризуются нейтральным, позитивным, а также негативным состояниями. Такие состояния являются отражением пользовательских мнений о рассматриваемой продукции. Кроме того, продвижение информации через соответствующие вершины графа приводит либо к отказу, либо к выполнению покупки покупателями. Пороговая модель с «цветными» узлами графа рассмотрена в работе [10]. Типы узлов выступают в качестве определителей вида поведения участников в сети. В качестве вида поведения представлены «потребители» и «рассказчики», являющиеся распространителями положительных и негативных мнений о продукции.

В работе [11] выполнено исследование показателя влияния в социальной сети Twitter. Для расчета данного показателя произведены выгрузка истории распространения сообщения, а также порядок его размещения на страницах. Рассмотрены различные схемы формирования показателя в зависимости от очередности размещения сообщения на страницах друзей пользователя.

В работе [12], опираясь на исторические данные, анализируется продвижение информации по социальной сети и выдвигается такое предположение: положительная реакция одного пользователя на какую-либо информацию или запись (лайки, репосты или комментарии) зачастую провоцирует другого пользователя оказать ответную реакцию.

В [13] выполнен анализ влияния пользователей Twitter с использованием трех показателей: число подписчиков, ретвитов и упоминаний другими пользователями. Отмечено, что число подписчиков характеризует популярность участника, количество ретвитов – ценность публикуемой информации, а частые упоминания имени свойственны для знаменитостей.

Работа [14] посвящена исследованию влияния участников при распространении контента в социальной сети Second Life. В частности, был сделан вывод, что скорость выбора рассматриваемого контента зависит от его использования друзьями пользователя.

В статье [15] предложен метод оценки影响力的 пользователей социальной сети с точки зрения некоторого управляющего центра, который определяет значимость действий её агентов.

В данной работе была использована независимая каскадная модель, так как механизм распространения информации при её использовании более всего соответствует выбранной схеме активации при заданном значении вероятности влияния, которая не делится между участниками сети. Кроме того, её реализация является менее трудоемкой по сравнению с линейной пороговой моделью: список активированных на предыдущем шаге вершин, как правило содержит меньше элементов, чем список неактивных вершин, а также в независимой каскадной модели отсутствует необходимость определения показателя влияния в соответствии с установленным ограничением (суммарное значение меньше 1).

В качестве узлов сети выступают пользователи онлайн-социальной сети «ВКонтакте», которых можно однозначно определить по идентификатору (id). На рис. 2, а представлен пример распространения информации (использованы три первые цифры id), под активацией вершины здесь понимается репост рекламного сообщения о проведении конкурса. Поскольку при реализации маркетингового мероприятия масштаб распространения информации определяется в большей степени характеристиками самой акции, то значения вероятности влияния будут одинаковы для всех ребер. Так, на рис. 2, б показан вариант передачи сообщения при показателе влияния, равном 0,35. На первом шаге рассматриваются подписчики группы. Если пороговое значение меньше показателя влияния, то узел активируется (будут активированы вершины с пороговыми значениями 0,2 и 0,3). На следующем шаге рассматриваются узлы, связанные с активированными вершинами (узел с пороговым значением 0,2 активирует вершину с пороговым значением 0,1). На последнем шаге узел с пороговым значением 0,1 не активирует ни одной вершины, и процесс распространения информации завершается. В ходе рассматриваемого мероприятия число подписчиков группы увеличилось на 1.

Исследование схем распространения информации при проведении конкурсов показало, что доля участников группы, сделавших репост записи, превышает долю пользователей, сделавших репост записи со страниц своих друзей. Это объясняется в том числе заинтересованностью существующих участников в характере деятельности группы. Вследствие этого можно выделить два показателя влияния маркетингового мероприятия: влияние на собственную аудиторию группы (p_1) и влияние на

сторонних пользователей (p_2). На рис. 2, в показател p_1 равен 0,35, а показатель p_2 – 0,15.

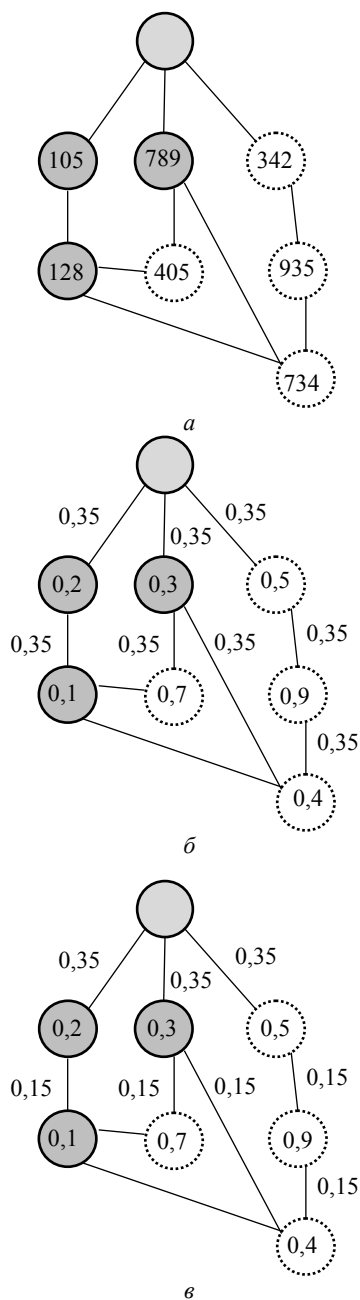


Рис. 2. Распространение информации в сети – а. Использование независимой каскадной модели – б. Различные вероятности для разных уровней элементов – в

Алгоритм решения задачи

Цель данной работы заключается в разработке алгоритма и реализации программы моделирования распространения информации в сети заданной структуры и оценке показателя влияния маркетингового мероприятия.

Алгоритм решения задачи включает следующие шаги:

Шаг 1. Сбор id участников сообщества до проведения маркетингового мероприятия.

Шаг 2. Загрузка истории реальных репостов и структуры сети, в которой осуществляется распространение информации.

Шаг 3. Моделирование распространения информации.

Шаг 4. Решение оптимизационной задачи с целью определения показателя влияния.

Для реализации шагов алгоритма была разработана программа на языке Java, которая использует методы API «ВКонтакте» и формирует Excel-таблицу с реальными и модельными значениями показателей. Создание формул позволяет решать оптимизационные задачи средствами Excel, проверять гипотезы «что будет, если...», например, оценить степень распространения информации при различных показателях влияния.

На первом шаге посредством обращения к методам API «ВКонтакте» происходит получение списка id подписчиков сообщества до проведения маркетингового мероприятия, полученные значения выгружаются в файл.

На следующих двух шагах происходит формирование таблицы на основе данных файла, сформированного на первом этапе, информации из социальной сети, получаемой с помощью методов API «ВКонтакте», и формул, созданных программным приложением

Для формирования схемы распространения реальных репостов программой выполняются следующие действия:

1. Загрузка в Excel-файл id участников группы до проведения маркетингового мероприятия (название листа соответствует названию группы).

2. Загрузка в массив **rep** из социальной сети id участников, разместивших информацию на своей странице.

3. Создание для каждого элемента из массива **rep** листа таблицы с названием, соответствующим id участника, сделавшего репост. Столбец созданного листа заполняется значениями id друзей пользователя.

4. Заполнение на всех листах столбца со значениями признака реального репоста r : величина устанавливается равной 1, если участником с соответствующим id был сделан репост со страницы другого пользователя или группы, 0 – в противном случае. Заполненные репосты удаляются из массива **rep**.

5. Проверка наличия элементов в массиве **rep**: если **rep** содержит id участников, то это означает, что пользователем, не состоявшим ранее в сообществе, был сделан репост записи со страницы группы. В этом случае проверяется возможность получения информации от друзей участников: осуществляется перебор листов и признак репоста устанавливается в первой строке, где был обнаружен id участника из массива **rep**.

На рис. 3 представлен пример таблиц для случая распространения информации, приведенного на рис. 2, б.

Id	r
105	1
789	1
342	0

Group

Id	r
128	1

105

Id	r
405	1
734	1

789

Id	r
105	0
405	0
734	0

128

Рис. 3. Таблицы со схемой распространения реальных репостов

Далее выполняется расчет следующих значений показателей (формулы создаются в Excel автоматически с помощью программного приложения Java).

Пороговые значения Tu : для каждого листа генерируется массив случайных чисел, равный числу элементов таблицы, при этом для участников с признаком реального репоста, равным 1, записываются минимальные из сгенерированных значений.

Признак возможности активации a (равен 1, если вершины, связанные с узлом, могут быть активированы, 0 – в противном случае): для участников сети активация возможна в том случае, если есть хотя бы одна активированная соседняя вершина. Так, на рис. 2, a каждый из друзей участника с id 789 может сделать репост с его страницы, поскольку им была размещена информация, а у друга участника с id 342 такой возможности нет. Для определения величины признака формируется формула со ссылками на модельные значения признака репоста участника: если хотя бы у одной связанной с текущим узлом вершины модельное значение репоста равно 1, текущий узел может быть активирован.

Модельное значение репоста r^* пользователя для каждого участника сообщества определяется по формуле

$$r^* = \begin{cases} 1, & \text{если } p \geq Tu, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Для остальных пользователей необходимо учесть возможность активации:

$$r^* = \begin{cases} 1, & \text{если } p \geq Tu \text{ и } a = 1, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

При разделении вероятности влияния в зависимости от принадлежности к участникам сообщества (см. рис. 2, в) определение показателя p осуществляется следующим образом:

- для участников группы: $p = p_1$;
- для остальных пользователей сети: $p = p_1 \cdot t = p_2$ (t – коэффициент уменьшения показателя влияния).

Абсолютная величина ошибки v определяется как квадрат разницы между признаком репоста и модельным значением признака репоста:

$$v = (r - r^*)^2.$$

Также вычисляются доля и средняя доля участников, сделавших репост [5].

На рис. 4 приведен пример связи таблиц и модельных значений показателей для случая, рассмотренного на рис. 2, б. Блок представляет собой фрагмент таблицы с значениями id, случайным образом сгенерированной пороговой величиной, модельным значением репоста и показателем возможности активации. Стрелками указаны ссылки на ячейки, которые используются для определения признака возможности активации. Так, например, признак возможности активации для участников с id 405 и 734 будет равен 1, если модельное значение репоста в таблице «Group», соответствующее участнику-подписчику с id 789, равно 1.

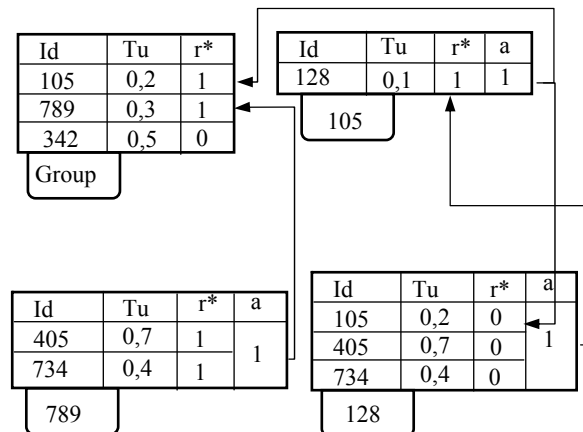


Рис. 4. Таблицы с модельными значениями показателей

На последнем шаге происходит решение задачи оптимизации с целью определения показателя влияния. Задача заключается в подборе показателя влияния таким образом, чтобы реальная и модельная схемы распространения информации наилучшим образом соответствовали друг другу:

$$f(p) = \sum_{i=1}^n (r_i(p) - r_i^*(p))^2 \rightarrow \min, \quad 0 \leq p \leq 1;$$

$$\sum_{j=1}^{m_k} r_j^*(p) \leq \sum_{j=1}^{m_k} r_j(p).$$
 (1)

где p – показатель влияния маркетингового мероприятия; $r_i(p)$ – признак репоста; $r_i^*(p)$ – модельное значение признака репоста; n – число участников в рассматриваемой сети; m_k – число записей k -го листа таблицы.

Последнее условие означает, что для каждого листа таблицы суммарное значение признака реального репоста должно быть равно или больше, чем суммарное значение признака модельного репоста. Это связано с загрузкой из социальной сети только тех элементов, которые были использованы при реальном распространении информации (сведения об элементах, которые могут быть задействованы в случае, если репост будет совершен другими пользователями, отсутствуют в программе).

Также вместо ограничения (1) может быть введен штраф в случае, если значение признака модельного репоста превышает величину признака реального репоста:

$$f(p) = \sum_{i=1}^n (r_i(p) - r_i^*(p))^2 + h_i^* \rightarrow \min, \quad 0 \leq p \leq 1;$$

$$h_i^* = \begin{cases} h_i, & \text{если } r_i^*(p) > r_i(p), \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где h_i – величина штрафа в случае, если значение признака модельного репоста превышает величину признака реального репоста; h_i^* – вычисленная величина штрафа для i -го участника.

Пример решения задачи моделирования

Для решения задачи моделирования была использована информация об участниках группы социальной сети «ВКонтакте» «BitStreet. Чехлы и аксессуары в Академгородке». До проведения конкурса группа насчитывала 726 подписчиков, в ходе проведения мероприятия 19 пользователей сделали репост записи с рекламным сообщением. Структура исследуемой сети включала 6448 элементов.

В таблице представлены результаты моделирования для десяти случайных реализаций. На рис. 5 приведены значения показателей влияния p_1 (для подписчиков группы) и t (коэффициент уменьшения). Величина абсолютной ошибки во всех случаях за исключением последней реализации получилась равной 7 (в последней реализации значение равно 8).

Результаты моделирования

Номер реализации	Показатель влияния, p	Ошибка, v	Средняя доля участников, сделавших репост
1	0,0008	24	0,0087
2	0,0020	25	0,0131
3	0,0019	25	0,0131
4	0,0012	24	0,0087
5	0,0012	26	0,0262
6	0,0029	25	0,0262
7	0,0012	25	0,0131
8	0,0012	26	0,0262
9	0,0018	24	0,0087
10	0,0012	25	0,0131

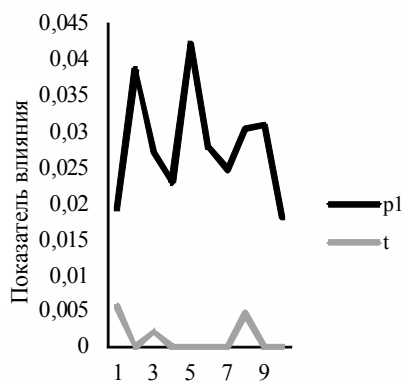


Рис. 5. Значение показателя влияния и коэффициента его уменьшения

Заключение

В статье предложен алгоритм оценки показателя влияния маркетингового мероприятия на основе каскадной модели распространения информации в сети, который включает загрузку данных социальной сети, расчет модельных значений показателей и решение оптимизационной задачи, где искомым показателем подбирается таким образом, чтобы минимизировать ошибку для наилучшего соответствия модельной схемы распространения информации реальной. Реализация алгоритма выполнена с помощью языка Java, для хранения данных о маркетинговом мероприятии и решения задачи моделирования использован табличный процессор Microsoft Excel. Рассмотрен пример оценки конкурса в группе социальной сети «ВКонтакте» с помощью данного алгоритма.

Предложенный алгоритм может быть использован для оценки и прогнозирования показателей распространения информации при проведении маркетинговых мероприятий в социальной сети.

Литература

1. Goyal S. Social networks and the firm / S. Goyal, J. Gagnon // Revista de Administracao. – 2016. – Vol. 51. – P. 240–243.
2. David A. Pricing strategies for viral marketing on social networks / A. David, M. Rajeev, S. Aneesh, X. Ying // Internet and Network economic. – 2009. – Vol. 5929. – P. 101–112.
3. Galeotti A. Influencing the influencers: a theory of strategic diffusion / A. Galeotti, S. Goyal // Rand Journal of economics. – 2009. – Vol. 40. – P. 509–532.
4. Грибанова Е.Б. Модель оценки групп социальной сети для реализации маркетинговых мероприятий / Е.Б. Грибанова, А.В. Катасонова // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 2. – С. 68–72.
5. Грибанова Е.Б. Алгоритмы моделирования распространения информации при маркетинговых мероприятиях в группах онлайн-социальной сети // Проблемы управления. – 2018. – № 1. – С. 66–73.
6. Wang Q. Energy Saving Information Cascades In Online Social Networks: An Agent-Based Simulation Study / Q. Wang, J. Taylor // Proc. of the 2013 Winter Simulation Conference. – 2013. – P. 3042–3050.
7. Modeling the spread of influence on the blogosphere / A. Java, P. Kolari, T. Finin, T. Oates // Proc. of the 15-th International World Wide Web Conference. – 2006. – P. 1–7.
8. HPC Simulations of Information Propagation over Social Networks / J. Jin, S. Turner, B. Lee, J. Zhong, H. Bingsheng // Procedia Computer Science. – 2012. – Vol. 9. – P. 292–301.
9. Influence maximization in social networks when negative opinions may emerge and propagate / W. Chen, A. Collins, R. Cummings et al. // Proc. of the 2011 SIAM International Conference on Data Mining. – 2011. – P. 379–390.
10. Bhagat S. Maximizing product adoption in social networks / S. Bhagat, A. Goyal, L. Lakshmanan // Proc. of the 5-th ACM International Conference on Web Search and Data Mining. – 2012. – P. 603–612.
11. Everyone’s an Influencer: Quantifying Influence on Twitter / E. Bakshy, J. Hofman, W. Mason, D. Watts // Proc. of the 4-th International Conference on Web Search and Web Data Mining. – 2011. – P. 1–10.

12. Торопов Б.А. Модель независимых каскадов пространства репоста в онлайн-социальной сети // Кибернетика и программирование. – 2016. – № 5. – С. 61–67.
13. Measuring user influence in Twitter: the million follower fallacy / M. Cha, H. Haddadi, F. Benevenuto, K. Gummadi // Proc. of the fourth international AAAI conference on weblogs and social media. – 2010. – P. 10–17.
14. Bakshy E. Social influence and the diffusion of user-created content / E. Bakshy, B. Karrer, L. Adamic // Proc. of the tenth ACM conference on Electronic commerce. – 2009. – P. 325–334.
15. Губанов Д.А. Влиятельность пользователей и метапользователей социальной сети / Д.А. Губанов, А.Г. Чхартишвили // Проблемы управления. – 2016. – № 6. – С. 12–17.

Грибанова Екатерина Борисовна

Канд. техн. наук, доцент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: katag@yandex.ru

Логвин Игорь Николаевич

Студент каф. АСУ, ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: igor31821788@gmail.com

Ширенков Иван Витальевич

Магистрант каф. АСУ, ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: ivanshirenkov@gmail.com

Gribanova E.B., Logvin I.N., Shirenkov I.V.

Algorithm for evaluating the marketing activities of the online social network Vkontakte based on the cascade model of information dissemination

The article considers the algorithm for assessing the impact of marketing activities in the social network Vkontakte using a cascade model of information dissemination. Its implementation involves loading data from social networks, modeling the spread of information and the solution of the optimization problem. As an example, the evaluation of the impact of the drawing in the social network group is considered.

Keywords: social network, competition, cascade model, information dissemination, influence.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-69-74

References

- Goyal S., Gagnon J. Social networks and the firm. *Revista de Administracao*, 2016, vol. 51, pp. 240–243.
- David A., Rajeev M., Aneesh S., Ying X. Pricing strategies for viral marketing on social networks. *Internet and Network economic*, 2009, vol. 5929, pp. 101–112.
- Galeotti A., Goyal S. Influencing the influencers: a theory of strategic diffusion. *Rand Journal of economics*, 2009, vol. 40, pp. 509–532.
- Gribanova E.B., Katasonova A.V. The model to evaluate social network groups for the implementation of marketing

activities. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, no. 2, pp. 68–72.

5. Gribanova E.B. Algorithms of modeling of marketing activities on the social network group using the cascade model. *Control sciences*, 2018, no. 1, pp. 66–73 (In Russ.).

6. Wang Q., Taylor J. Energy Saving Information Cascades In Online Social Networks: An Agent-Based Simulation Study. *Proc. of the 2013 Winter Simulation Conference*, 2013, pp. 3042–3050.

7. Java A., Kolari P., Finin T., Oates T. Modeling the spread of influence on the blogosphere. *Proc. of the 15-th International World Wide Web Conference*, 2006, pp. 1–7.

8. Jin J., Turner S., Lee B., Zhong J., Bingsheng H. HPC Simulations of Information Propagation over Social Networks. *Procedia Computer Science*, 2012, vol. 9, pp. 292–301.

9. Chen W., Collins A., Cummings R. et al. Influence maximization in social networks when negative opinions may emerge and propagate. *Proc. of the 2011 SIAM International Conference on Data Mining*, 2011, pp. 379–390.

10. Bhagat S., Goyal A., Lakshmanan L. Maximizing product adoption in social networks. *Proc. of the 5-th ACM International Conference on Web Search and Data Mining*, 2012, pp. 603–612.

11. Bakshy E., Hofman J., Mason W., Watts D. Everyone's an Influencer: Quantifying Influence on Twitter. *Proc. of the 4-th International Conference on Web Search and Web Data Mining*, 2011, pp. 1–10.

12. Toropov B.A. Model of independent cascades of repost distribution in the online social network. *Cybernetics and programming*, 2016, no. 5, pp. 61–67 (In Russ.).

13. Cha M., Haddadi H., Benevenuto F., Gummadi K. Measuring user influence in Twitter: the million follower fallacy. *Proc. of the Fourth International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*, 2010, pp. 10–17.

14. Bakshy E., Karrer B., Adamic L. Social influence and the diffusion of user-created content. *Proc. of the tenth ACM Conference on Electronic Commerce*, 2009, pp. 325–334.

15. Gubanov D.A., Chkhartishvili A.G. Influence of users and users of the social network. *Control sciences*, 2016, no. 6, pp. 12–17 (In Russ.).

Ekaterina B. Gribanova

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Department of Automated Control System, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: katag@yandex.ru

Igor N. Logvin

Student, Department of Automated Control System, TUSUR 40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: igor31821788@gmail.com

Ivan V. Shirenkov

Master student, Department of Automated Control System, TUSUR 40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: ivanshirenkov@gmail.com

УДК 658.5+519.7

В.А. Харитонов, Д.Н. Кривоги́на

Системные связи компонентов управления ассортиментом строительных материалов

Под единицей ассортимента строительных материалов и конструкций понимается точное соответствие характеристик строительных изделий заданным условиям их эксплуатации и функциональному назначению в объектах недвижимости. Данный подход предполагает учет предпочтений субъектов управления ассортиментом строительных материалов и конструкций. Под субъектами управления понимаются подсистемы потребителя и производителя строительных материалов и конструкций. Однако возрастающая роль человеческого фактора ослабляет структурные связи между данными подсистемами. Актуальность исследования заключается в возможности существенной экономии ресурсов строительной отрасли посредством введения дополнительной подсистемы информационного обеспечения разработки ассортимента строительных материалов и конструкций. Данная подсистема способна решать задачи оптимизации ассортимента строительных изделий на основе системного анализа и применения методов субъектно-ориентированного управления. Предложенный подход позволит повысить степень структурированности системных связей между подсистемами управления ассортиментом строительных конструкций объектов недвижимости.

Ключевые слова: ассортимент, строительные материалы и конструкции, бетон, система управления ассортиментом строительных конструкций, функциональное назначение, условия эксплуатации, модель описания альтернатив, заинтересованные лица.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-75-81

Актуальность

В современной отрасли производства изделий из бетона показатели качества готового изделия определяются диапазоном варьирования характеристик материала, из которого изготавливается данный конструктивный элемент, внутри области, определенной нормативными требованиями. Такой подход характеризуется принципом унификации (единообразия технических характеристик) [1].

В соответствии с таким подходом к управлению процессами производства строительных материалов (УПП СМ) естественно предположить, что каждый фактически выпускаемый СМ становится универсальным для всех строительных конструкций (СК) одного типа, независимо от их функционального назначения (ФН) и условий эксплуатации (УЭ) в здании. Однако следует заметить, что при строительстве и эксплуатации объекта недвижимости (ОН) строительные конструкции принимают на себя значительно отличающиеся друг от друга нагрузки и подвергаются различным эксплуатационным воздействиям, и в каждом конкретном случае можно будет обнаружить избыток или недостаток отдельных качественных (технических) параметров СК по сравнению с необходимым. Это приводит к снижению эксплуатационных показателей здания и к частичной или полной замене отдельных конструктивных элементов.

Поэтому принципу унификации целесообразно противопоставить оптимизацию строительных конструкций в соответствии с их функциональным назначением и условиями эксплуатации в составе объекта недвижимости, что позволит сократить последующий рост издержек ресурсов строительной отрасли. При этом нормативный подход предлагается сочетать с более экономичным ассортиментным подходом. Результатом ассортиментного подхода

является производство оптимального строительного материала, характеристики которого должны удовлетворять конкретным эксплуатационным требованиям, предъявляемым индивидуально к каждой конструкции в объекте недвижимости [2].

Для осуществления процедуры реализации ассортиментного подхода необходимо рассмотреть выпуск ассортимента СК как сложную систему, имеющую сложные структурные связи [3, 4].

Разработка модели системы управления ассортиментом строительных конструкций

Система управления ассортиментом строительных конструкций (АСК) включает в себя три подсистемы: подсистему потребителя (заказчика), подсистему информационного обеспечения разработки АСК, подсистему производителя СК, компоненты которых тесно взаимосвязаны между собой (рис. 1).

Рассмотрим более подробно компоненты данной системы и их взаимодействие на примере производства ассортимента плит перекрытия из тяжелого бетона для объекта недвижимости.

В общем случае система управления АСК может быть представлена реализацией последовательности операций.

1. На начальном этапе из внешней среды в систему управления производством АСК поступает информация об эксплуатации объекта недвижимости, о назначении конструктивных элементов в здании и агрессивных воздействиях внешней среды на СК ОН [5].

2. После чего на основе данной информации о функциональном назначении и условиях эксплуатации ОН проектировщиком, представляющим интересы заказчика, осуществляется процедура формализации требований к СК [6], которая представлена в табл. 1.

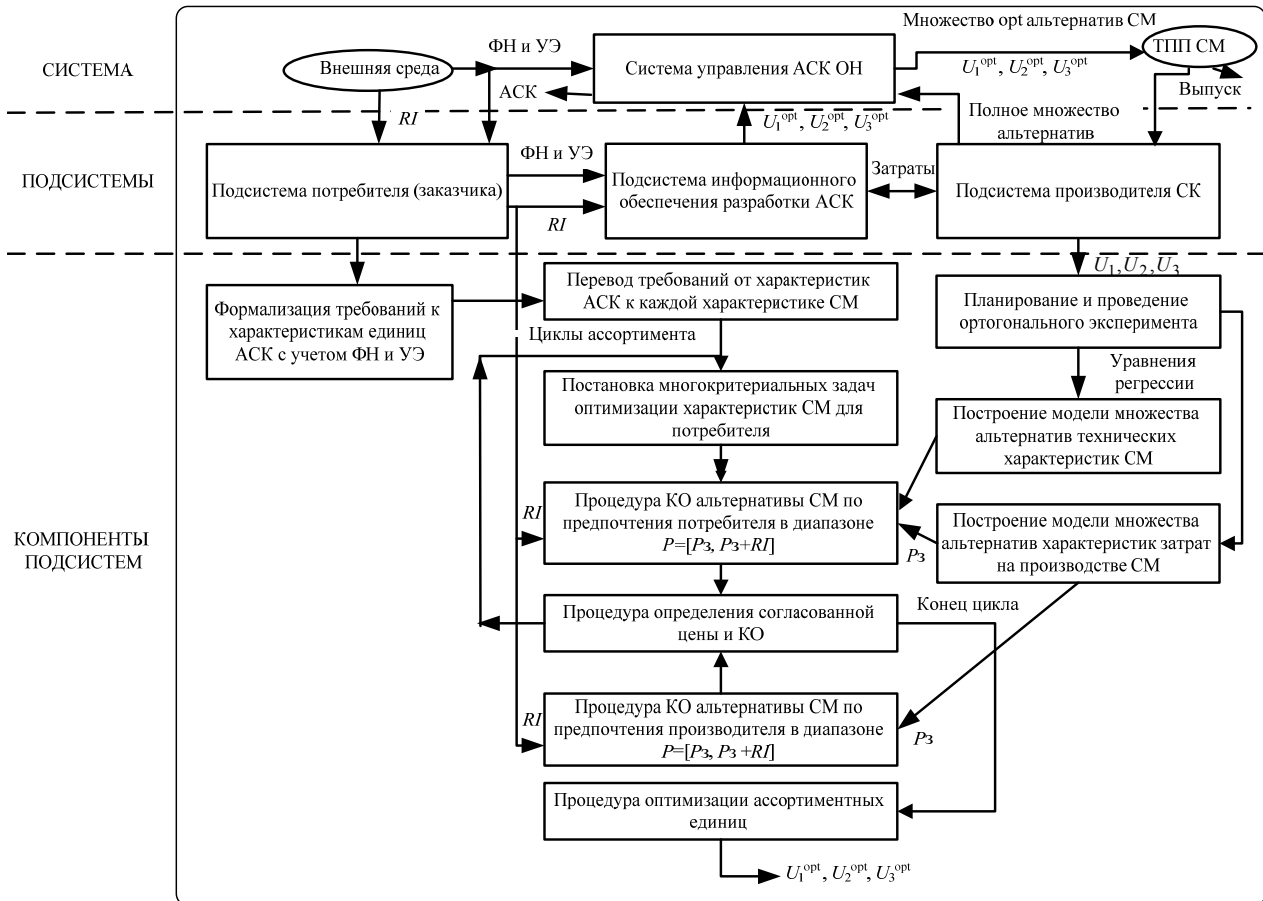


Рис. 1. Системные связи в управлении ассортиментом строительных конструкций объекта недвижимости

Таблица 1
Эксплуатационные требования к строительным конструкциям

№	Эксплуатационные воздействия	Ед. изм
Ассортиментная единица №1		
1	Статические и динамические нагрузки	16,7 кН/см ²
2	Шумы и звуки (ударные и воздушные)	<49 дцБ
3	Температурные перепады	≥ F200 Циклы
Ассортиментная единица №2		
1	Статические и динамические нагрузки	14,8 кН/см ²
2	Шумы и звуки (ударные и воздушные)	<32 дцБ
3	Температурные перепады	≥ F150 Циклы

Проектировщиком учитывается оценка степени воздействий среды на элементы сооружений, нагрузки и определяется категория условия эксплуатации.

3. После завершения процедуры формализации требований к характеристикам строительных конструкций осуществляется процедура перевода данных требований на характеристики строительных материалов (табл. 2) [7, 8]. Данную процедуру проводит системный инженер, специалист в области производства строительных материалов и конструкций на основе разработанной базы данных соотношения требований к характеристикам материала и нагрузок и эксплуатационных условий конструкций в здании [9].

На данном этапе подсистемой информационного обеспечения разработки АСК осуществляется постановка многокритериальных задач оптимизации характеристик СМ, удовлетворяющих заданным

требованиям по ФН и УЭ [10]. Постановка задачи оптимизации наиболее существенных характеристик СМ в соответствии с рассматриваемым примером может быть представлена следующим образом:

$$\hat{X}_{1,4} = (K_1x_1 + K_2x_2 + K_3x_p) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где x_1, x_2 – технические характеристики СМ; x_p – цена за единицу продукции, руб.; K_1, K_2, K_3 – взвешенные коэффициенты характеристик СМ.

Количество ассортиментных единиц СК определяется количеством постановок многокритериальных задач оптимизации характеристик строительных материалов, зависящих от изменения нагрузок и воздействий на конструктивные элементы объекта недвижимости [11].

На данных этапах прослеживается взаимодействие двух подсистем: потребителя и информационной системы в отношении формирования технического задания на изготовление продукта.

4. Основываясь на информации о воздействиях внешней среды и назначении СК в ОН, система управления АСК определяет технологический процесс изготовления (ТПП) СК, включающий ряд производственных переделов (прием, складирование и подготовка исходных компонентов, их дозировку и перемешивание, транспортировку смеси, формование изделия, выгрузку, доводку и т.д.) [12–14].

Требования к техническим характеристикам строительных материалов

x №	Прочность, МПа	Плотность, кг/м ³	Морозостойкость, цикл	Водонепроницаемость, коэфф.
Ассортиментная единица №1				
1	$x_1 \rightarrow \max$ $x_1 \geq 30$	$x_2 \rightarrow \min$ $x_2 < 2400$	$x_3 \rightarrow \max$ $x_3 \geq 200$	$x_4 \rightarrow \max$ $x_4 > 2$
2	$x_1 \rightarrow \max$ $x_1 > 10$	$x_2 \rightarrow \min$ $x_2 < 2400$		$x_4 \rightarrow \max$ $x_4 \geq 4$
3	$x_1 \rightarrow \max$ $x_1 > 10$	$x_2 \rightarrow \min$ $x_2 < 2400$		$x_4 \rightarrow \max$ $x_4 \geq 4$
Требования к характеристикам СМ	$x_1^{\max} \geq 30$	$x_2 < 2400$	$x_3 \geq 200$	$x_4^{\max} \geq 4$;
Ассортиментная единица №2				
1	$x_1 \rightarrow \max$ $x_1 \geq 25$	$x_2 \rightarrow \min$ $x_2 < 2400$	$x_3 \rightarrow \max$ $x_3 \geq 130$	$x_4 \rightarrow \min$ $x_4 \leq 6$
2	$x_1 \rightarrow \max$ $x_1 > 10$	$x_2 \rightarrow \min$ $x_2 < 2400$		$x_4 \rightarrow \min$ $x_4 \leq 6$
3	$x_1 \rightarrow \max$ $x_1 > 10$	$x_2 \rightarrow \min$ $x_2 < 2400$		$x_4 \rightarrow \min$ $x_4 \leq 6$
Требования к характеристикам СМ	$x_1^{\max} \geq 30$	$x_2 < 2400$	$x_3 \geq 130$	$x_4^{\max} \leq 6$

5. На основе выбранного ТПП подсистемой производителя СК проводится процедура планирования и проведения промышленного (ортогонального) эксперимента в области варьирования выбранных параметров управления производством СМ U_1, U_2, U_3 [15]. Результатом ортогонального эксперимента является получение функций отклика (уравнений регрессии) для каждой востребованной характеристики СМ (x_1, x_2, \dots, x_n), зависящих от изменения параметров управления U_1, U_2, U_3 . В нашем случае анализ полученных данных предлагается осуществлять при помощи стандартных методик обработки результатов эксперимента и получения математических моделей зависимости функций отклика от исходных параметров: В/ц (водоцементное отношение – U_1), п/ц (соотношения мелкого и крупного заполнителя – U_2), Д (содержание повышающей морозостойкость суперпластифицирующей добавки ПФМ-НЛК по отношению к массе цемента – U_3). Проверку результатов проведения данного ортогонального эксперимента целесообразно проводить при помощи применения программного комплекса «STATISTICA» [16].

В результате проведения ортогонального эксперимента и обработки полученных данных, в том числе проверки воспроизводимости опытов и оценки значимости коэффициентов, были получены уравнения регрессии для таких характеристик: x_1 – прочность при сжатии, МПа, x_2 – морозостойкость, цикл, x_3 – водонепроницаемость, коэфф., x_4 – плотность, кг/м³.

$$x_1 = 133,54 + 71,03 \times U_1 - 272,5 \times U_2 - 110,122 \times U_3 - 133,93 \times U_1^2 + 197,19 \times U_2^2 + 106,33 \times U_3^2 + 12,74 \times U_1 \times U_2 + 62,06 \times U_1 \times U_3 - 18,72 \times U_2 \times U_3, \quad (2)$$

$$x_2 = 33,86 - 618,65 \times U_1 - 63,19 \times U_2 + 1764,12 \times U_3 + 1127,57 \times U_1^2 + 855,97 \times U_2^2 - 219,91 \times U_3^2 - 1171,61 \times U_1 \times U_2 - 1334,26 \times U_1 \times U_3 - 388,89 \times U_2 \times U_3, \quad (3)$$

$$x_3 = 47,236 - 97,72 \times U_1 - 19,31 \times U_2 - 0,36 \times U_3 + 60,67 \times U_1^2 + 5,1 \times U_2^2 + 5,9 \times U_3^2 + 14,07 \times U_1 \times U_2 - 5,19 \times U_1 \times U_3 + 0,83 \times U_2 \times U_3, \quad (4)$$

$$x_4 = 2679,66 + 1053,08 \times U_1 - 1093,6 \times U_2 - 22,5 \times U_3 - 1188,48 \times U_1^2 + 962,14 \times U_2^2 + 10,65 \times U_3^2 - 740,74 \times U_1 \times U_2 + 19,44 \times U_1 \times U_3 - 21,29 \times U_2 \times U_3. \quad (5)$$

Следует отметить, что потребитель и производитель имеют различное представление о качестве готового продукта и как следствие по-разному интерпретируют существенные характеристики материала. Поэтому с целью отражения предпочтений обоих заинтересованных лиц необходимо рассмотреть два набора существенных характеристик СМ [17, 18].

Полученные уравнения регрессии, представленные выражениями (2)–(5), являются основой для построения модели множества альтернатив технических характеристик СМ, отражающих интересы потребителя. В качестве основных характеристик материала, являющихся существенными для производителя, были выбраны затраты на исходные компоненты смесеобразования y_1 и производственные издержки y_2 , включающие в себя: затраты на электроэнергию, амортизационные отчисления, фонд заработной платы основных производственных рабочих с отчислением на социальное страхование, затраты на топливо, затраты на арматуру и затраты на накладные расходы в размере 65% от фонда заработной платы. Сумма затрат на исходные компоненты и производственные издержки есть себестои-

мость изделия. Данные характеристики также зависят от изменения параметров управления производством U_1, U_2, U_3 , т.е. от соотношения исходных компонентов состава смеси.

Построение модели множества альтернатив СМ необходимо осуществлять в программно-информационной среде «Декон-СМ». Данная программа позволяет создавать необходимые модели и инструменты, направленные на учет всех существенных связей «состав – структура – свойства» бетонной смеси и отвечающие требованиям оптимального управления составом многокомпонентного материала. Следует отметить, что в соответствии с предлагаемым подходом к выбору обоснованного ассортимента, необходимо построить два набора матриц-массивов для отдельного заполнения существенными характеристиками материала с позиций предпочтений потребителя и производителя (рис. 2). Это позволит учесть полное мнение обоих заинтересованных лиц в отношении привлекательности конечного продукта.

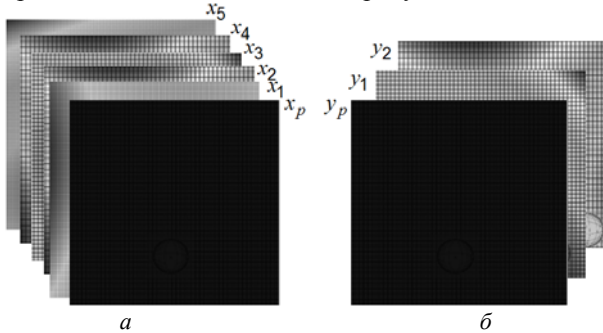


Рис. 2. Матрицы-массивы, заполненные существенными характеристиками потребителя (а) и производителя (б)

В результате анализа множества альтернатив характеристик СМ, полученных в программно-информационной среде «Декон-СМ» на основе требований по ФН и УЭ, полученным в табл. 2, были определены следующие альтернативы СМ, значения характеристик которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

Альтернативы вариантов строительных материалов для производства строительных конструкций

№ альтернативы УПП СМ	Характеристики потребителя				Характеристики производителя	
	Прочность при сжатии	Плотность	Морозостойкость	Водонепроницаемость	Затраты на компоненты	Производственные издержки
1	30	2450	245	7	2524	3183
2	30	2450	256	7	2475	3113
3	30	2445	242	6	2446	3069

6. Далее осуществляется процедура комплексного оценивания полученных альтернатив СМ по предпочтениям потребителя и производителя в диапазоне ценовой привлекательности на основе пошагового увеличения нормы прибыли от 0 до 60% от

себестоимости изделия. Таким образом, определяется ценовая привлекательность реализации каждой альтернативы. Данная информация необходима для построения композиций моделей предпочтений заинтересованных лиц.

Для нахождения цены были применены механизм комплексного оценивания «Джобс-Декон» и процедура субъектно-ориентированного ценообразования [19], отличительной особенностью которой является свойство неманипулируемости (защищенности от попыток манипулирования результатом обоими участниками ценообразования), обозначающее независимость суждений заинтересованных лиц от внешних условий и влияний. Это особенно актуально в случае, когда в управлении участвуют лица с различными предпочтениями.

Известно, что субъект не способен осуществлять процедуру выбора правильно, руководствуясь только интуицией в случаях сложности задач выбора по параметрам многоальтернативности, многофакторности исходных данных и чувствительности к их динамике, а также в условиях опасности манипулирования результатами со стороны внешней среды. На данных этапах реализации ассортиментного подхода прослеживается возможность принятия оптимального решения субъектом за счет вовлечения в процедуру выбора подсистемы информационного обеспечения АСК. Проблема преодолевается за счет расширения для субъекта выбора области определения корректных задач ранжирования / выбора, обеспеченных гарантированным выполнением отношения строгого порядка на основе механизации его ментальной деятельности при помощи механизма комплексного оценивания, основанного на линейной свертке, и известного положения Стива Джобса о целесообразности «соединения креативности и технологичности».

Рассмотрим в качестве примера привлекательность альтернативы ассортимента СМ № 1.

В программном продукте «Джобс-Декон» разрабатываются две модели предпочтений. В каждой модели выстраиваются функции приведения для всех характеристик материала, отражающие интересы потребителя и производителя. После чего ранжируются данные характеристики по степени важности для конкретного субъекта выбора (потребителя и производителя) с целью получения взвешенных коэффициентов. Затем осуществляется построение функции чувствительности для ценовой привлекательности конкретной альтернативы СМ с пошаговым увеличением нормы прибыли.

Функции чувствительности, отражающие удовлетворенность процессом роста нормы прибыли участниками ценообразования, представлены на рис. 3 и 4. На оси абсцисс отображены варианты увеличения нормы прибыли от 0 до 60% (0–6) от себестоимости продукции. На оси ординат представлен уровень удовлетворенности от результатов увеличения нормы прибыли в квалитетрическом

представлении 1–4, где 1 – неудовлетворительно, 2 – удовлетворительно, 3 – хорошо и 4 – отлично.

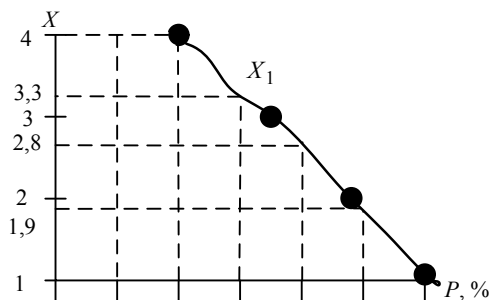


Рис. 3. Удовлетворенность процессом роста нормы прибыли потребителем (X)

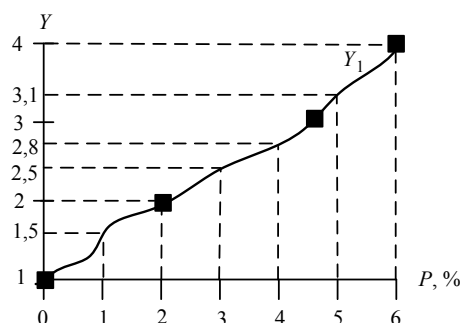


Рис. 4. Удовлетворенность процессом роста нормы прибыли производителем (Y)

На следующем этапе, поочередно, на моделях предпочтений производителя и потребителя в программном продукте «Джобс-Декон» осуществляется процедура определения привлекательности выпуска конкретной альтернативы СМ с пошаговым увеличением нормы прибыли. Сначала вводятся неизменяемые параметры характеристик материала альтернативы СМ, а затем поэтапно от 0 до 60% от себестоимости продукта увеличивается цена реализации изделия и фиксируются значения КО. Так, например, альтернатива СМ № 1 на модели предпочтений производителя при увеличении нормы прибыли на 60% будет иметь комплексную оценку, равную 3,35. Данная комплексная оценка интерпретируется как хорошо.

На основе полученных оценок привлекательности осуществим процедуру построения композиций моделей предпочтений потребителя и производителя в совместном отображении функций чувствительности (рис. 5). Данные, позволяющие получить композиции моделей предпочтений заинтересованных лиц, представлены в табл. 4.

Результатом данной процедуры является определение равновесного состояния, приводящего к согласованной (справедливой) цене объекта p^* при совпадении комплексных оценок моделей предпочтений обоих заинтересованных лиц $\hat{X}(p^*)$ и $\hat{Y}(p^*)$. Для альтернативы № 1 согласованная цена равна 8382 руб. Аналогично проводим подобную процедуру для всех альтернатив СМ, представленных в табл. 3, и получаем полную модель описания множества альтернатив управлений производством СМ, на

которой будут осуществляться все дальнейшие операции по выбору. В данном конкретном случае согласованная цена изготовления плит перекрытия ассортимента № 1 составила для альтернативы № 1 8382 руб., № 2 – 8835 руб., № 3 – 8156 руб.

Таблица 4
Композиция моделей предпочтений потребителя и производителя

P	X ₁	\hat{X}		P	Y ₁	\hat{Y}
Альтернатива №1						
5588 (0%)	4	4		5588 (0%)	1	2,03
6147 (10%)	4	4		6147 (10%)	1,5	2,25
6706 (20%)	4	4		6706 (20%)	2	2,47
7264 (30%)	3,3	3,75		7264 (30%)	2,5	2,65
7823 (40%)	2,8	3,47		7823 (40%)	2,8	2,83
8382 (50%)	1,9	3,19		8382 (50%)	3,1	3,06
8941 (60%)	1	2,87		8941 (60%)	4	3,35

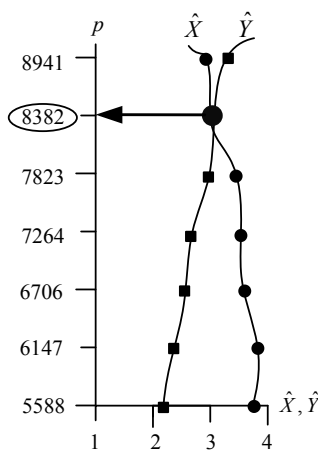


Рис. 5. Процедура ценообразования для альтернативы № 1

7. На следующем этапе осуществляется процедура комплексного оценивания альтернатив на основе оптимизации требуемых характеристик материала, которая представлена выражением (1).

В результате процедуры комплексного оценивания полученных альтернатив (рис. 6) в программном продукте «Джобс-Декон» выявили, что наибольшую комплексную оценку, равную 3,05, в данном случае имеет альтернатива № 2.

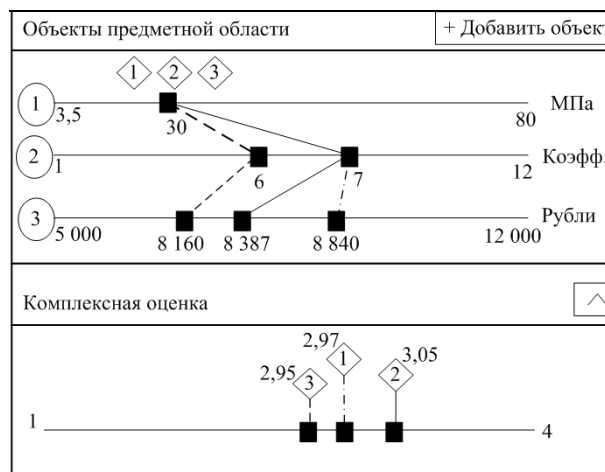


Рис. 6. Скриншот программы «Джобс-Декон», показывающий комплексное оценивание альтернатив потребителем

В случае невозможности определения оптимальной альтернативы потребителем, ввиду получения одинаковых комплексных оценок у нескольких альтернатив СК, процесс ее назначения осуществляется на основе предпочтений производителя или автоматически.

Производитель также на основе построенных функций приведения определяет наилучшую альтернативу по комплексной оценке.

8. Завершающим этапом является процедура выбора ассортиментных единиц для всех поставленных задач многокритериальной оптимизации выпуска ассортимента СК.

Заключение

В результате реализации представленной модели управления ассортиментом строительных конструкций появляется возможность учета функционального назначения и условий эксплуатации конструктивных элементов в объекте недвижимости, что способствует рациональному использованию исходных компонентов и достижению оптимального набора эксплуатационных характеристик СК.

Также данная система способствует улучшению взаимоотношений между подсистемами производителя и потребителя (заказчика) строительных конструкций за счет полного учета предпочтений заинтересованных лиц при помощи подсистемы информационного обеспечения разработки ассортимента СК, что позволяет снизить риск негативного влияния человеческого фактора на результат производства.

Литература

1. Большаков В.И. Основы теории и методологии многопараметрического состава бетонов / В.И. Большаков, Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Днепропетровск: ПГАСА, 2006. – 360 с.
2. Кривоги́на Д.Н. Концепция субъектно-ориентированной оптимизации технологических процессов производства ассортимента строительных материалов / Д.Н. Кривоги́на, В.А. Харитонов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 167–172.
3. Данилов А.М. Отраслевые аспекты системного анализа / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 4. – С. 55–58.
4. Данилов А.М. Строительные материалы как системы / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С. 55–58.
5. Al A.M.H. Evaluation and selection of curtain wall systems for medium-high rise building construction / A.M.H. Al, M.A. Hassanain, M.N. Juaim // Structural Survey. – 2014. – Vol. 32, No. 4. – P. 299–314. – DOI: 10.1108/SS-10-2013-0035
6. Сетков В.И. Строительные конструкции / В.И. Сетков, Е.П. Сербин. – М.: Инфра-М, 2007. – 448 с.
7. Морозов Ю.Л. Система управления характеристиками товарного бетона на основе информационных технологий // Строительные материалы. – 2001. – Т. 4. – С. 21.
8. Lauven L.P. Simultaneously optimizing the capacity and configuration of biorefineries / L.P. Lauven, I. Karschin, J. Geldermann. // Computers and Industrial Engineering. – 2018. – Vol. 124. – P. 12–23. – DOI: 10.1016/j.cie.2018.07.014
9. Косяков А. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Свит, С. Сеймур, С. Бимер. – М.: ДМК-Пресс, 2017. – 624 с.

10. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983. – 384 с.

11. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 256 с.

12. Building global change resilience: Concrete has the potential to ameliorate the negative effects of climate-driven ocean change on a newly-settled calcifying invertebrate / B. Mos, S.A Dworjanyn, L.T. Mamo, B.P. Kelaher // Science of the Total Environment. – 2019. – No. 646. – P. 1349–1358. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.379

13. Rohden A.B. Increasing the sustainability potential of a reinforced concrete building through design strategies: Case study / A.B. Rohden, M.R Garcez // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – No. 9. – P. 174. – DOI: 10.1016/j.cscm. 2018.e00174

14. Баженов Ю.М. Технология бетона строительных изделий и конструкций / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 172 с.

15. Концепция автоматизации и управления технологическими процессами производства газобетона автоклавного твердения / В.А. Шаманов, С.В. Леонтьев, В.А. Голубев, В.А. Харитонов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – Т. 5. – С. 558–563.

16. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. – СПб.: Изд. дом «Питер», 2003. – 688 с.

17. Кривоги́на Д.Н. Инструментальные средства «соединения креативности и технологичности» в задачах субъектно-ориентированного управления / Д.Н. Кривоги́на, Н.И. Сафонов, В.А. Харитонов, А.В. Вычегжанин, А.М. Гревцев // Управление экономическими системами. Электронный научный журнал. – 2017. – Режим доступа: <http://uecs.ru/instrumentalniimetodyekonomiki.pdf> (дата обращения: 13.07.2018).

18. Мухина М.К. Изучение стиля жизни потребителей и сегментирование рынка на основе психографических типов // Журнал «Маркетинг в России и за рубежом». – 2000. – Т. 3. – URL: <http://www.mavriz.ru/articles/2000/3/262.html> (дата обращения: 13.07.2018).

19. Кривоги́на Д.Н. Механизмы субъектно-ориентированного ценообразования в задачах управления венчурными проектами / Д.Н. Кривоги́на, В.А. Харитонов, Л.К. Гейхман // Вестник Перм. ун-та. Сер. «Экономика». – 2017. – Т. 12, № 1. – С. 61–77. – DOI: 10.17072/1994-9960-2017-1-61-77

Харитонов Валерий Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор каф. строительного инжиниринга и материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) Комсомольский пр-т, д. 29, г. Пермь, Россия, 614990
Тел.: +7 (342-2) 19-84-09
Эл. почта: cems@pstu.ru

Кривоги́на Дарья Николаевна

Аспирантка каф. строительного инжиниринга и материаловедения ПНИПУ Комсомольский пр-т, д. 29, г. Пермь, Россия, 614990
Тел.: +7-992-214-80-64
Эл. почта: darya.krivogina@gmail.com

Kharitonov V. A., Krivogina D.N

System communications of components in management of the construction materials assortment

Under assortment unit of building materials and structures is meant the exact compliance of the characteristics of building products to the specified conditions of their operation and functionality in real estate object. This approach involves taking into account the preferences of the managers responsible for the range of building materials and constructions. Under management subjects are taken subsystems of the consumer and the manufacturer of building materials and constructions. However, the increasing role of the human factor weakens the structural links between these subsystems. The relevance of a research consists in a possibility of essential economy of resources in construction branch by introducing an additional subsystem of information support to develop the range of construction materials and constructions. This subsystem is capable of solving problems of optimization for the assortment of construction products based on the system analysis and application of methods of subject-oriented management. The offered approach will allow improving the structure of system communications between subsystems for managing the range of building constructions of real estate objects.

Keywords: assortment, building materials and constructions, concrete, control system of the assortment of building constructions, functionality, service conditions, model of the description of alternatives, interested persons.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-75-81

References

1. Bol'shakov V.I., Dvorkin L.I., O.L. Dvorkin. *Osnovy teorii i metodologii mnogoparametricheskogo sostava betonov* [Fundamentals of the theory and methodology of multiparameter composition of concrete]. Dnepropetrovsk, PGASA, 2006, 360 p. (In Russ.).
2. Krivogina D.N., Kharitonov V.A. [The concept of subject-oriented optimization of technological processes for the production of an assortment of building materials]. *Vestnik IzhSTU. M.T. Kalashnikov*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 167–172 (In Russ.).
3. Danilov A.M., Gar'kina I.A. [Sectoral aspects of system analysis]. *Regional architecture and construction*, 2016, no 4, pp. 55–58 (In Russ.).
4. Gar'kina I.A., Danilov A.M., Korolev Ye.V. [Building materials as systems]. *Building materials*, 2006, no 7, pp. 55–58 (In Russ.).
5. Al A.M.H., Hassanain M.A., Juaim M.N. Evaluation and selection of curtain wall systems for medium-high rise building construction. *Structural Survey*, 2014, vol. 32, no. 4, pp. 299–314. doi: 10.1108/SS-10-2013-0035
6. Setkov V.I., Serbin Ye.P. *Stroitel'nyye konstruksii* [Building construction]. Moscow, Infra-M, 2007. 448 p. (In Russ.).
7. Morozov YU. L. [Control system of characteristics of commodity concrete on the basis of information technologies]. *Building Materials*, 2001, no. 8, pp. 21 (In Russ.).
8. Lauen L.P., Karschin I., Geldermann J. Simultaneously optimizing the capacity and configuration of biorefineries. *Computers and Industrial Engineering*, 2018, vol. 124, pp. 12–23. doi: 10.1016/j.cie.2018.07.014
9. Kosyakov A.U., Svit S., Seymour S., Bimer S. *Sistemnaya inzheneriya. Printsipy i praktika* [System Engineering. Principles and practice]. Moscow, DMK-Press, 2017, 624 p. (In Russ.).
10. Polyak B.T. *Vvedeniye v optimizatsiyu* [Introduction to optimization]. Moscow, Nauka, 1983, 384 p. (In Russ.).
11. Podinovskiy V.V., Nogin D. *Pareto-optimal'nyye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* [Pareto-optimal solutions of multicriteria problems]. Moscow, Science, The main edition of physics and mathematics, 1982, 256 p. (In Russ.).
12. Mos B., Dworjanyn S.A., Mamo L.T., Kelaher B.P. Building global change resilience: Concrete has the potential to ameliorate the negative effects of climate-driven ocean change on a newly-settled calcifying invertebrate. *Science of the Total Environment*, 2019, no. 646, pp. 1349–1358. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.379
13. Rohden A.B., Garcez M.R. Increasing the sustainability potential of a reinforced concrete building through design strategies: Case study. *Case Studies in Construction Materials*, 2018, no. 9, pp. 174. doi: 10.1016/j.cscm.2018.e00174
14. Bazhenov YU.M., Alimov L.A., Voronin V.V. *Tekhnologiya betona stroitel'nykh izdeliy i konstruksiy* [Technology of concrete of construction products and structures]. Moscow, Publisher ASV, 2016, 172 p. (In Russ.).
15. Shamanov V.A., Leont'yev S.V., Golubev V.A., Kharitonov V.A. [The concept of automation and control of technological processes for producing aerated concrete of autoclave hardening]. *Scientific and Technical Herald of the Volga Region*, 2015, no. 5, pp. 558–563 (In Russ.).
16. Borovikov V. *STATISTIKA. Iskusstvo analiza dannykh na kompyutere: dlya professionalov* [STATISTICA. The art of data analysis on a computer: for professionals]. SPb.: Izd. dom «Piter», 2003, 688 p. (In Russ.).
17. Krivogina D.N., Safonov N.I., Kharitonov V.A., Vychezhzhanin A.V., Grevtsev A.M. [Tools for "connecting creativity and manufacturability" in tasks of subject-oriented management]. *Upravlenie ehkonomicheskimi sistemami. EHlektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2017 (In Russ.). Available at: <http://uecs.ru/instrumentalniimetyekonomiki.pdf> (access: ed 13.07.2018).
18. Mukhina M.K. [Studying the lifestyle of consumers and segmenting the market on the basis of psychographic types]. *ZHurnal «Marketing v Rossii i za rubezhom»*, 2000, no. 3 (In Russ.). Available at: <http://www.mavriz.ru/articles/2000/3/262.html> (accessed: 13.07.2018).
19. Kharitonov V.A., Geikhman L.K., Krivogina D.N. Mechanisms of object oriented pricing in venture project management tasks. *Vestnik Permskogo universiteta. Seria Ekonomika = Perm University Herald. Economy*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 61–77. doi: 10.17072/1994-9960-2017-1-61-77

Valerii A. Kharitonov

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Civil Engineering and Material, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky pr., Perm, Russia, 614990
Phone: +7 (342-2) 19-84-09
Email: cems@pstu.ru

Dar'ya N. Krivogina

PhD student, Department of the Department of Civil Engineering and Material, Perm National Research Polytechnic University 29, Komsomolsky pr., Perm, Russia, 614990
Phone: +7 (992) 214-80-64
Email: darya.krivogina@gmail.com

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 681.5.015.3

В.М. Рулевский, В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова

Аппроксимация нелинейной математической модели системы электропитания глубоководного аппарата

Приводится сравнительная оценка методов описания переходных характеристик разомкнутой системы электропитания (СЭП) глубоководного аппарата для решения задачи аппроксимации ее сложной математической модели передаточными функциями. Рассмотрены графические и численные методы расчета параметров передаточных функций, для которых дана оценка точности аппроксимации нелинейной модели СЭП. Проведенные исследования позволили выбрать наиболее приемлемый по точности и практической реализации метод аппроксимации экспериментальной характеристики выходного напряжения реальной системы электропитания с передачей энергии по кабель-тросу.

Ключевые слова: система электропитания, передача энергии по кабель-тросу, передаточная функция, алгоритм расчета параметров передаточной функции.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-85-92

Эффективность работы современных привязанных телеуправляемых необитаемых глубоководных аппаратов (ТНПА) с передачей электрической энергии по кабель-тросу в значительной степени определяется свойствами системы электропитания (СЭП), основные силовые элементы и управляющий контроллер которой расположены на судне или береговом надводном оборудовании [1–7]. Главным требованием для таких СЭП является качественная стабилизация питающего напряжения электромеханическими устройствами подводного аппарата с точностью не ниже 10% от номинального значения.

Наиболее подходящим вариантом математического описания динамических процессов в СЭП могут быть модели, отражающие их «физику» в терминах переменных состояния и позволяющие применить методы современной теории управления для построения эффективных регуляторов в замкнутой системе [8, 9]. Определяющим условием аналитической записи параметров закона регулирования является наличие достаточно адекватной математической модели объекта управления.

Однако синтез регуляторов в системах управления весьма сложными объектами с нелинейными непрерывными и дискретными элементами в большинстве случаев возможен только в результате численного определения параметров закона регулирования. Целесообразным же вариантом, с точки зрения практических приложений, будет линеаризованная модель СЭП в пространстве переменных состояний, которая позволяет синтезировать законы управления на основе теории линейных систем. Современной тенденцией развития этого варианта для многомерного объекта большого порядка можно считать представление части его нелинейных элементов в виде аппроксимирующих передаточных функций [10–12]. Математические модели СЭП ТНПА, рассмотренные в работах авторов статьи [8, 9, 13], содержат не только большое количество нелинейных дифференциальных уравнений с нестационарными параметрами, но и коммутационно-разрывные функции.

Задача аппроксимации сложных моделей более простыми имеет ряд решений, и в зависимости от рассматриваемых моделей могут быть различными и требования к точности аппроксимации. В настоящее время существует несколько методов определения передаточной функции по экспериментально полученной характеристике, которые отличаются друг от друга способом представления информации, критериями приближения и особенностями расчета.

Постановка задачи

Для адекватного описания в классе линеаризованных математических моделей возникает задача выбора оптимального метода аппроксимации переходных характеристик нелинейного многомерного объекта – СЭП телеуправляемого необитаемого глубоководного аппарата или его элементов на основе передаточных функций.

Рассмотрим модель СЭП в виде передаточной функции (ПФ), когда имеется запаздывание по управляющему воздействию:

$$W(s) = \frac{A(s)}{B(s)} e^{-\tau s}, \quad (1)$$

где $A(s), B(s)$ – полиномы по степеням оператора s ; $e^{-\tau s}$ – операторное изображение звена запаздывания; τ – время запаздывания.

При выборе структуры и критерия приближения модели к рассматриваемому объекту нужно учитывать, что один и тот же объект может описываться моделями различных порядков, при этом каждая будет с достаточной точностью отражать реальные свойства объекта.

Так, некоторые методы требуют нормирования экспериментальной переходной характеристики. Если в результате эксперимента получена кривая выходной переменной состояния, то после деления всех ее значений на величину входного воздействия будет получена нормированная переходная $h(t)$ характеристика.

Точность аппроксимации обычно оценивается через относительное отклонение:

$$\delta = \max \frac{|h(t_i) - h_a(t_i)|}{h(\infty)} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $h(t_i)$ – значения экспериментальной переходной характеристики; $h_a(t_i)$ – найденной по аппроксимирующей ПФ; $h(\infty)$ – значение экспериментальной переходной характеристики в установившемся режиме; t_i – моменты времени.

Обычно предполагается, что если значение δ не превышает (5–8)%, то точность аппроксимации соответствует требованиям для практического применения.

При замене исходной многомерной модели на математическую модель более низкого порядка важной задачей является выбор эффективного метода, позволяющего получить передаточную функцию рассматриваемого объекта управления, удовлетворяющую следующим условиям: порядок полинома знаменателя должен быть не выше 4; отсутствие нулей передаточной функции; погрешность аппроксимации меньше 5%.

Методы аппроксимации рассматривались применительно к виду графика переходной характеристики кривой $h_u(t)$ напряжения на нагрузке (рис. 1), полученной в результате моделирования СЭП ТНПА мощностью 21 кВт [13]. Данная характеристика является нормированной кривой изменения напряжения на нагрузке СЭП.

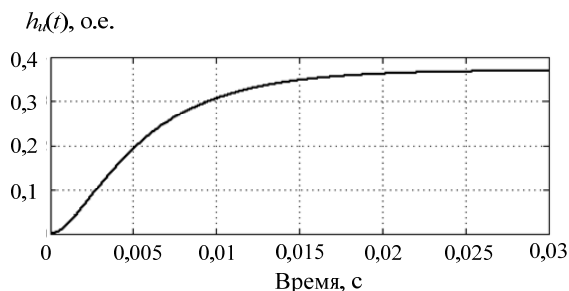


Рис. 1. Нормированная кривая напряжения на нагрузке СЭП

Графические методы расчета

Для получения передаточной функции можно использовать как графические, так и численные методы расчета. К графическим методам относятся метод номограмм и метод Шварца [14, 15], которые не требуют автоматизированного расчета и после процедуры коррекции решения дают достаточно точные результаты.

Алгоритм расчета методом номограмм:

1. По переходной характеристике определяются отрезки времени, отражающие необходимую информацию о свойствах объекта.

2. Аппроксимирующая передаточная функция ищется в виде

$$W(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)^n}, \quad (3)$$

где T_1, T_2 – постоянные времени, которые будут определены по номограммам; $(n+1)$ – порядок модели объекта.

При этом значения экспериментально полученной $h_u(t)$ и аппроксимирующей $h_{au}(t)$ характеристик должны совпасть в точках $t=0, t=\infty$, а также в точке перегиба t_{Π} , которая находится из условия: $h'_{au}(t_{\Pi}) = 0$.

Следовательно, критерии приближения можно записать в следующем виде:

$$h_{au}(0) = h_u(0), \quad h_{au}(\infty) = h_u(\infty) = h_{уст},$$

$$h_{au}(t_{\Pi}) = h_u(t_{\Pi}) = h_{\Pi}, \quad h'_{au}(t_{\Pi}) = h'_u(t_{\Pi}).$$

Производная $h'_{au}(t)$ определяется путем проведения касательной в точке перегиба, затем находится длина отрезка T_0 как расстояние между точками пересечения касательной с осью времени и линией установившегося значения характеристики $h_{уст}$ (рис. 2).

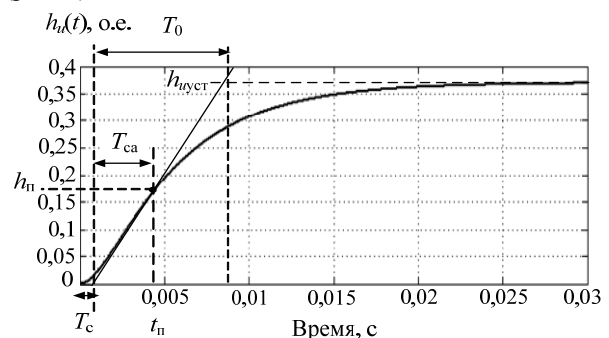


Рис. 2. Определение параметров передаточной функции по переходной характеристике

Положение точки перегиба не всегда удается выбрать с достаточной точностью, но это не считается недостатком метода, а свидетельствует о том, что близким переходным характеристикам могут соответствовать сильно различающиеся по структуре передаточные функции.

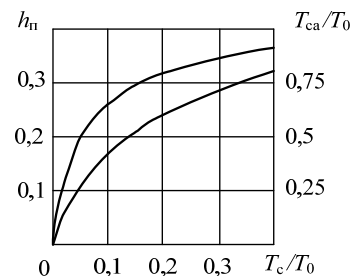


Рис. 3. Зависимости для определения точки перегиба

Для повышения точности определения точки перегиба можно воспользоваться зависимостями, представленными на рис. 3 [15], показывающими связь между координатой точки перегиба и отношением временных интервалов T_c/T_0 и T_{ca}/T_0 (см. рис. 2).

Порядок объекта может быть определен из табл. 1, при этом если отношение T_c/T_0 несколько отличается от представленных значений, то выбирается более низкий порядок из табл. 1.

Из графика (см. рис. 2) $T_c/T_0 = 0,0009/0,00765 = 0,12$ и $T_{ca}/T_0 = 0,0036/0,00765 = 0,47$, по зависимости,

представленной на рис. 3, выбрана точка перегиба с координатами $t_{\pi} = 0,0043$ с и $h_{\pi} = 0,17$. Из табл. 1 следует, что аппроксимацию нужно проводить передаточной функцией, имеющей второй или больший порядок.

Т а б л и ц а 1
Определение порядка модели объекта

n	1	2	3	4	5
T_c/T_0	0	0,104	0,218	0,319	0,410

Дальнейшие расчеты проводятся с помощью номограммы, приведенной на рис. 4.

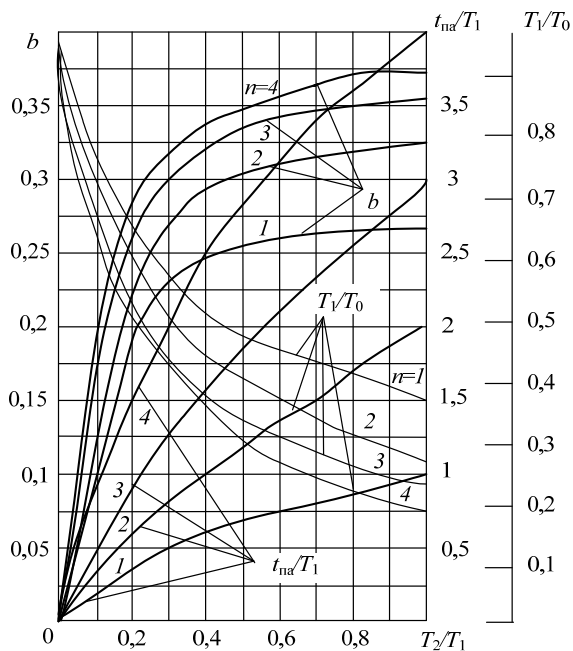


Рис. 4. Номограмма для определения параметров передаточной функции

В зависимости от значения $b=h_{\pi}$ при выбранном n по номограмме определяются отношения T_1/T_0 , T_2/T_1 , $t_{\text{па}}/T_1$, где $t_{\text{па}} = t_{\pi} - \tau$ — интервал между координатой точки перегиба и временем запаздывания τ . Найденные отношения позволяют последовательно найти постоянные времени T_1 , T_2 , а также определить время запаздывания передаточной функции $\tau = t_{\pi} - t_{\text{па}}$ [14]. Для рассматриваемого объекта управления с найденной точкой перегиба на переходной характеристике (см. рис. 2) значения коэффициента $b = h_{\pi} = 0,17$ и постоянной времени $T_0 = 0,00765$ с. Из номограммы, изображенной на рис. 4, следует возможность аппроксимации передаточной функцией типа (3) при значении $b = 0,17$, если $n \geq 1$. Для $n=1$ аппроксимация может быть осуществлена передаточной функцией, состоящей из двух аperiодических звеньев:

$$W(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{(T_1s+1)(T_2s+1)} \quad (4)$$

Из номограммы при $n=1$ и $b = 0,17$ находим отношения $T_1/T_0 = 0,68$, $T_2/T_1 = 0,2$, $t_{\text{па}}/T_1 = 0,38$.

Очевидно, что $k = h_{\text{уст}} = 0,37$ (см. рис. 2) и при $T_0 = 0,00765$ с можно определить параметры $T_1 = 0,0052$ с, $T_2 = 0,001$ с, $t_{\text{па}} = 0,002$ с. В аппроксимируемой характеристике практически нет запаздывания, поэтому время τ запаздывания принимаем равным нулю.

Тогда передаточная функция (ПФ) запишется в виде

$$W(s) = \frac{0,37}{(0,0052s+1)(0,001s+1)} \quad (5)$$

Для уточнения результата выберем $n = 2$, тогда при $b = 0,17$ из рис. 4 $T_1/T_0 = 0,67$, $T_2/T_1 = 0,12$, следовательно, можно определить значения: $T_1 = 0,005$ с, $T_2 = 0,0006$ с.

В результате получим передаточную функцию третьего порядка:

$$W(p) = \frac{0,37}{(0,005s+1)(0,0006s+1)^2} \quad (6)$$

На рис. 5 представлены переходные характеристики, полученные в результате модельного эксперимента — $h_u(t)$ (кривая 1) и при аппроксимации передаточными функциями второго (кривая 2) и третьего (кривая 3) порядков. Как следует из графиков, применение метода номограмм позволяет получить достаточно точную аппроксимацию. Для рассматриваемого случая погрешность составила 4% при аппроксимации ПФ второго порядка и 3,8% — третьего порядка.

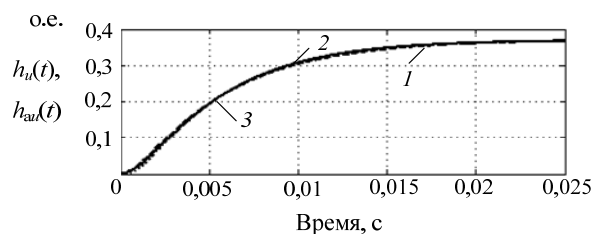


Рис. 5. Переходные характеристики при аппроксимации передаточными характеристиками методом номограмм

Метод Шварца [15] также позволяет без применения автоматизированного расчета получить передаточную функцию моделируемого объекта в виде

$$W(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{(Ts+1)^n} \quad (7)$$

В этом случае модель объекта составляется из n одинаковых последовательно соединенных аperiодических звеньев. Для определения коэффициента k усиления объекта, постоянной T времени и показателя n степени к переходной характеристике в точке перегиба проводится касательная и также определяются отрезки времени $T_0 = 0,00765$ с, $t_{\pi} = 0,0043$ с, $T_c = 0,0009$ с (см. рис. 2).

Затем из графиков (рис. 6) и по найденному соотношению $T_0/T_c = 8,5$ определяется показатель степени, в данном случае $n = 2$, значение которого при известном t_{π} позволяет найти постоянную вре-

мени $T = 0,0043/1,35 = 0,003$ с по графику, представленному на рис. 6.

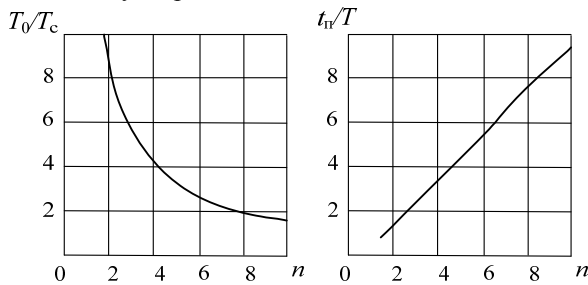


Рис. 6. Зависимости, для определения параметров передаточной функции методом Шварца

Следовательно, передаточную функцию можно записать в виде

$$W(s) = \frac{0,37}{(0,003s + 1)^2}. \quad (8)$$

Результаты моделирования представлены на рис. 7, погрешность аппроксимации составила 4,3%.

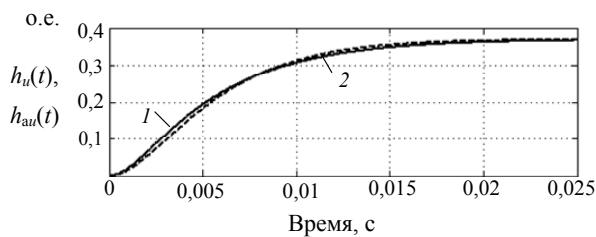


Рис. 7. Переходные характеристики при аппроксимации исходной модели объекта методом Шварца:

$h_u(t)$ – кривая 1, $h_{au}(t)$ – кривая 2

Общим недостатком графических методов являются зависимость точности аппроксимации от качества построения номограмм, а также сложность их автоматизации.

Численные методы расчета

Другим вариантом построения аппроксимирующей передаточной функции является метод площадей [16], на основании которого рассматриваемый объект описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, а его нормированная переходная характеристика аппроксимируется передаточной функцией следующего вида:

$$W(s) = \frac{(1 + b_1s + \dots + b_ms^m)e^{-\tau s}}{(1 + a_1s + \dots + a_ns^n)}, \quad (9)$$

где $b_1 \dots b_m; a_1 \dots a_n$ – постоянные коэффициенты полиномов числителя и знаменателя передаточной функции, определяемые параметрами модели СЭП.

Практика расчетов показывает, что степень полинома знаменателя целесообразно ограничить на уровне трех. Коэффициенты числителя принимаются равными нулю по условию проведения аппроксимации. Тогда с учетом условий выбора передаточной функции для дальнейшего синтеза регулятора (отсутствие нулей) функция (9) может быть представлена в виде

$$W(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{(1 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3)}. \quad (10)$$

Для нахождения явного вида выражения (10) необходимо определить значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 . Определение параметров передаточной функции возможно на основе следующего алгоритма [17]:

1. Ось времени экспериментальной характеристики разбивается на m равных промежутков времени Δt , на каждом из которых нелинейная часть характеристики заменяется линейной.

2. Проводится вычисление значения

$$F_1 = \Delta t \left(\sum_{i=0}^m (1 - h(i)) - 0,5(1 - h(0)) \right), \quad (11)$$

где $h(i)$ – экспериментальное значение переходной характеристики в конце каждого промежутка времени Δt .

3. Рассчитываются значения

$$F_2 = F_1^2 \Delta t \left(\sum_{i=0}^m (1 - h(i)) \cdot (1 - \lambda(i)) - 0,5(1 - h(0)) \right), \quad (12)$$

$$F_3 = F_1^3 \Delta t \left(\sum_{i=0}^m (1 - h(i)) \cdot \left(1 - 2\lambda(i) + \frac{\lambda^2(i)}{2} \right) - 0,5(1 - h(0)) \right),$$

где $\lambda(i) = \frac{i\Delta t}{F_1}$.

4. Находятся постоянные коэффициенты

$$a_1 = F_1; \quad a_2 = F_2; \quad a_3 = F_3. \quad (13)$$

Найденные коэффициенты подставляются в формулу (9) и полученная по аппроксимирующей функции характеристика сравнивается с экспериментальной. Если погрешность аппроксимации получается больше 8%, следует уменьшить временной интервал и повторить расчет.

В результате расчетов, проведенных по представленному алгоритму, была получена следующая передаточная функция:

$$W(s) = \frac{0,37}{7,663 \cdot 10^{-6} s^2 + 5,832 \cdot 10^{-3} s + 1}, \quad (14)$$

при этом погрешность аппроксимации не превысила 4% (рис. 8). Коэффициент передаточной функции $a_3 = F_3$ в результате расчетов получился отрицательным, это значит, что рассматриваемая система неустойчива, что не согласуется с реальной информацией об объекте. Для получения приемлемого результата нужно понизить порядок полинома знаменателя.

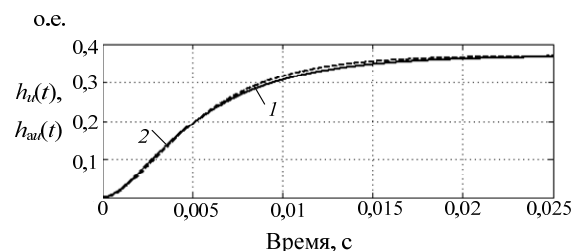


Рис. 8. Переходные характеристики при аппроксимации исходной модели методом площадей:

$h_u(t)$ – кривая 1; $h_{au}(t)$ – кривая 2

Метод площадей хорошо поддается автоматизированному расчету и позволяет получить достаточно точную аппроксимацию.

Процесс аппроксимации в случае применения регрессионного метода наименьших квадратов (МНК) включает определение вида функции $f(t)$, по форме максимально отражающей характер расположения экспериментальных точек, выбор которых определяется из анализа экспериментальной характеристики (начальное и конечное значение, характер изменения во времени и т.д.) [18]. Тогда уравнение регрессии запишется в виде $h_{au}(t) = f(t)$, где $f(t)$ – некоторая аналитическая зависимость, в качестве которой может быть использована, например, сумма экспоненциальных функций:

$$h_{au}(t) = a_1 e^{-a_2 t} + a_3 e^{-a_4 t} + \dots + a_{m-1} e^{-a_m t}. \quad (15)$$

Степенные полиномы для решения данной задачи не рассматриваются, так как конечной целью является получение передаточной функции. Универсальные методики обоснования вида и порядка регрессионной функции для систем с интервальным изменением параметров в настоящее время отсутствуют.

Для оценки точности аппроксимации целесообразно использовать минимум квадратичной невязки

$$J(a_i) = \sum_{j=1}^n (h_u(t_j) - h_{au}(t_j))^2 = \sum_{j=1}^n \left(h_u(t_j) - \left(a_1 e^{-a_2 t_j} + a_3 e^{-a_4 t_j} + \dots + a_{m-1} e^{-a_m t_j} \right) \right)^2 \rightarrow \min.$$

Коэффициенты переходной характеристики (15) находятся в результате решения системы уравнений, в основе которых лежит задача определения экстремума по каждому неизвестному коэффициенту a_i :

$$\frac{\partial J(a_i)}{\partial a_i} = 0, \quad i = 1 \dots m. \quad (16)$$

Основной трудностью данного метода являются выбор переходной характеристики, а также подбор начальных условий, что не всегда является очевидным. Также, изменение вида переходной характеристики вызывает изменение системы уравнений (16), что усложняет алгоритм и делает более сложным процесс автоматизированного расчета. Кроме того, все численные методы решения нелинейных систем сильно зависят от начального приближения.

Для аппроксимации МНК выбрано несколько переходных характеристик и произведен расчет параметров передаточной функции. Результаты проведенных вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов МНК для системы электроснабжения мощностью 21 кВт

	Вид переходной характеристики	Передаточная функция	δ, %
1	$h_{au}(t) = 1 + a_1 e^{-a_2 t} - a_3 e^{-a_4 t},$ $a_1 = \frac{T_1}{T_2 - T_1}; a_2 = \frac{1}{T_1}; a_3 = \frac{T_2}{T_2 - T_1}; a_4 = \frac{1}{T_2}$	$W(s) = \frac{0,37}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)},$ $T_1 = 0,0001 \text{ с}, T_2 = 0,006 \text{ с}$	5,8
2	$h_{au}(t) = 1 - (1 + a_1 t) e^{-a_1 t}, a_1 = \frac{1}{T}$	$W(s) = \frac{0,37}{(Ts + 1)^2}, T = 0,003 \text{ с}$	5,3
3	$h_{au}(t) = 1 - \left(1 + a_1 t + \frac{a_1^2 t^2}{2} \right) e^{-a_1 t}, a_1 = \frac{1}{T}.$	$W(p) = \frac{0,37}{(Ts + 1)^3}, T = 0,0019 \text{ с}$	4,8
4	$h_{au}(t) = 1 - a_1 e^{-a_2 t} + (a_3 + a_4 t) e^{-a_5 t}, a_1 = \frac{T_1^2}{(T_1 - T_2)^2};$ $a_2 = \frac{1}{T_1}; a_3 = \frac{(2T_1 - T_2)T_2}{(T_1 - T_2)^2}; a_4 = \frac{1}{T_1 - T_2}; a_5 = \frac{1}{T_2}$	$W(s) = \frac{0,37}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)^2},$ $T_1 = 0,003 \text{ с}, T_2 = 0,0017 \text{ с}$	4,5
5	$h_{au}(t) = 1 - a_1 e^{-a_2 t} \sin(a_3 t - a_4) - a_5 e^{-a_6 t},$ $a_1 = \frac{1}{a_3 \sqrt{T^2 (1 - 2a_2 T_1) + T_1^2}}; a_2 = \frac{\xi}{T}; a_3 = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T};$ $a_4 = \arctg\left(\frac{a_3 T_1}{1 - a_2 T_1}\right) - \arctg\left(\frac{a_3}{a_2}\right); a_5 = \frac{T_1^2}{T^2 (1 - 2a_2 T_1) + T_1^2};$ $a_6 = \frac{1}{T_1}$	$W(s) = \frac{0,37}{(T_1 s + 1)(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1)},$ $T_1 = 0,0005 \text{ с}, T = 0,0035 \text{ с},$ $\xi = 0,8$	5

Как показали расчеты, наиболее приемлемым вариантом является аппроксимация переходной характеристики передаточной функцией, представ-

ляющей собой соединение колебательного и аperiодического звеньев. Графики экспериментальной $h_u(t)$ и переходных характеристик $h_{au}(t)$, построен-

ных по передаточным функциям, полученным в результате аппроксимации переходной характеристики МНК, представлены на рис. 9, 10.

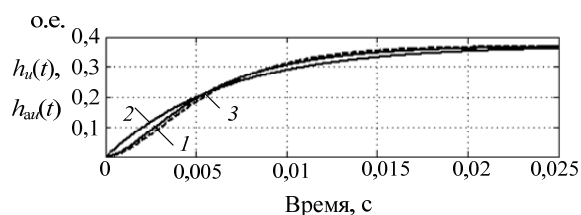


Рис. 9. Экспериментальная $h_u(t)$ – кривая 1 и переходные характеристики $h_{au}(t)$: кривая 2 – ПФ 1; кривая 3 – ПФ 2 из табл. 2

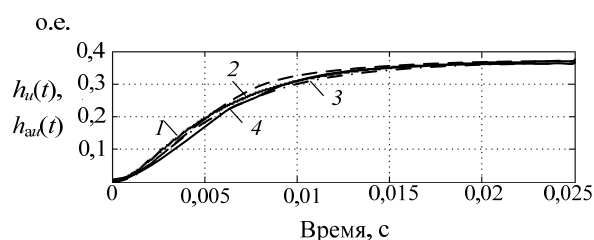


Рис. 10. Экспериментальная $h_u(t)$ – кривая 1 и переходные характеристики $h_{au}(t)$: кривая 2 – ПФ 3; кривая 3 – ПФ 4; кривая 4 – ПФ 5 из табл. 2

Переходные характеристики, построенные по формулам, представленным в табл. 2, с точностью до 98% совпадают с экспериментальной, в то время как эти же характеристики, построенные через полученные передаточные функции, дают определенную погрешность (см. табл. 2). Поэтому найденные значения постоянных времени необходимо корректировать для повышения точности расчета.

Хотя метод наименьших квадратов дает точные результаты при нахождении коэффициентов переходной характеристики, наиболее рациональным и универсальным алгоритмом с точки зрения минимизации вычислительных затрат в цифровых регуляторах для аппроксимации исходной модели СЭП является алгоритм, основанный на методе площадей, применение которого дает незначительную погрешность. Описание алгоритма определения параметров передаточной функции предлагаемым методом приведено в данной статье, а его математическая составляющая представлена формулами (10)–(13).

Проведенные исследования позволили выбрать наиболее приемлемый по точности и практической реализации метод аппроксимации экспериментальной характеристики выходного напряжения реальной системы электропитания глубоководного аппарата. При определенных допущениях таким методом является метод площадей, позволяющий организовать эффективные алгоритмы определения параметров передаточной функции разомкнутой системы электропитания.

Статья написана по материалам исследований, выполненных в рамках работ по проекту 8.8184.2017/8.9 «Методология создания систем

энергогенерирующих и энергопреобразующих устройств для наземных и бортовых комплексов наземного, космического и подводного базирования».

Литература

1. Capocci R. Inspection-class remotely operated vehicles-a review / R. Capocci, G. Dooly, E. Omerdić et al. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2017. – Vol. 5(1), No. 13. – P. 1–6.
2. AC subsea power transmission architectures, design and challenges, the martin linge case / T. Skaanoey, U. Kerin, N. Van Luijk, E. Thibaut // Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. – 2017. – Vol. 4. – P. 2920–2928.
3. Liu H. Design and experiment of control system for underwater ocean engineering structure inspection and cleaning remotely operated vehicle / H. Liu, Z. Song, S. Liang et al. // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 375. – P. 865–879.
4. Ludvigsen M. Towards integrated autonomous underwater operations for ocean mapping and monitoring / M. Ludvigsen, A.J. Sørensen // Annual Reviews in Control. – 2016. – Vol. 42. – P. 145–157.
5. Gerashchenko A.N. Method of energy efficiency assessment for power supply of autonomous drive systems for perspective mobile objects / A.N. Gerashchenko, N.I. Kulikov, A.V. Makarenko // Russian Aeronautics. – 2015. – Vol. 58, No. 4. – P. 461–465.
6. Design of sub-sea long distance electric power supply system / S. Xiao, T. Wei, K. Xiaojuan, P. Ying // DRPT 2011 – 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. – 2011. – No. 5994183. – P. 1760–1763.
7. Hazel T. Taking power distribution under the sea: Design, manufacture, and assembly of a Subsea electrical distribution system / T. Hazel, H.H. Baerd, J.J. Legeay, J.J. Bremnes // IEEE Industry Applications Magazine. – 2013. – Vol. 19(5), No. 6553138. – P. 58–67.
8. Букреев В.Г. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования / В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова, В.М. Рулевский // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 4. – С. 119–132.
9. Rulevskiy V.M. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.O. Kuleshova et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177(1), No. 012098. – P. 1–6.
10. Долинина А.А. Алгоритм моделирования нелинейных устройств на основе методов понижения порядка моделей и кусочно-линейной аппроксимации / А.А. Долинина, В.Н. Ланцов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – Т. 4, № 16. – С. 28–33.
11. Zhang J. Multivariable nonlinear model of ultrasonic motor based on Hammerstein model and uniform design / J. Zhang, T. Zhang, Z. Xie, W. Wu // Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2010. – No. 5554611. – P. 5794–5799.
12. Li H. An improved reduced-order model of an electric pitch drive system for wind turbine control system design and simulation / H. Li, C. Yang, Y. Hu, J. Zhang // Renewable Energy. – 2016. – Vol. 93. – P. 188–200.
13. Mathematical model for the power supply system of an autonomous object with an AC power transmission over a cable rope / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.O. Kuleshova et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177(1), No. 012073. – P. 1–7.

14. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.

15. Фафурин В.А. Автоматизация технологических процессов и производств: лабораторный практикум / В.А. Фафурин, И.Н. Терюшов. – Казань: Изд-во Казан. гос. технолог. ун-та, 2008. – 552 с.

16. Рутковский А.Л. Оптимизация коэффициентов передаточной функции, полученной модифицированным методом Симою по экспериментально снятой переходной характеристике / А.Л. Рутковский, Л.И. Матвеева, Г.В. Козачек // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 6, № 3. – С. 138–141.

17. Макаров И.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал) / И.М. Макаров, Б.М. Менский. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.

18. Айвазян С.А. Методы эконометрики. – М.: Магистр, 2010. – 512 с.

Рулевский Виктор Михайлович

Канд. техн. наук, директор Научно-исследовательского института автоматизации и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9229-8611>
Тел.: +7-906-950-04-01
Эл. почта: rulevsky@niiam.tomsk.ru

Букреев Виктор Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>
Тел.: +7-913-854-21-96
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

Шандарова Елена Борисовна

Канд. техн. наук, доцент Инженерной школы энергетики НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>
Тел.: +7-913-811-98-26
Эл. почта: shandarovaelena@mail.ru

Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Shandarova E.B.

Approximation of a nonlinear mathematical model of the power system of a deep-sea apparatus

A comparative evaluation of methods for describing the transient characteristics of an open power supply system (PSS) for a deep-water vehicle is proposed to solve the problem of approximating its complex mathematical model by transfer functions. Graphic and numerical methods for calculating the parameters of the transfer functions are considered, for which the accuracy of the approximation of the nonlinear PSS model is estimated. The conducted research allowed us to choose the method of approximation of the experimental characteristic of the output voltage of a real power supply system.

Keywords: power supply system, power transmission by cable-cable, transfer function, algorithm for calculating the parameters of the transfer function.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-85-92

References

1. Capocci R., Dooly G., Omerdić E. et al. Inspection-class remotely operated vehicles-a review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2017, vol. 5(1), no. 13, pp. 1–6.

2. Skaanoey T., Kerin U., Van Luijk N., Thibaut E. AC subsea power transmission architectures, design and challenges, the martin linge case. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, 2017, Vol. 4, pp. 2920–2928.

3. Liu H., Song Z., Liang S. et al. Design and experiment of control system for underwater ocean engineering structure inspection and cleaning remotely operated vehicle. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2016, vol. 375, pp. 865–879.

4. Ludvigsen M., Sørensen A.J. Towards integrated autonomous underwater operations for ocean mapping and monitoring. *Annual Reviews in Control*, 2016, vol. 42, pp. 145–157.

5. Gerashchenko A.N., Kulikov N.I., Makarenko A.V. Method of energy efficiency assessment for power supply of autonomous drive systems for perspective mobile objects. *Russian Aeronautics*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 461–465.

6. Xiao S., Wei T., Xiaojuan K., Ying P. Design of subsea long distance electric power supply system. *DRPT 2011 – 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2011, no. 5994183, pp. 1760–1763.

7. Hazel T., Baerd H.H., Legeay J.J., Bremnes J.J. Taking power distribution under the sea: Design, manufacture, and assembly of a Subsea electrical distribution system. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2013, vol. 19 (5), no. 6553138, pp. 58–67.

8. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M. Power supply system model of remote processing equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 119–131.

9. Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Kuleshova E.O. et al. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177(1), no. 012098, pp. 1–6.

10. Dolinina A.A., Lantsov V.N. Algorithm of simulation of nonlinear devices on the basis of reduced order model methods and piecewise linear approximation. *Radio and telecommunication systems*, 2014, no. 4(16), pp. 28–33 (In Russ.).

11. Zhang J., Zhang T., Xie Z., Wu W. Multivariable nonlinear model of ultrasonic motor based on Hammerstein model and uniform design. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2010, no. 5554611, pp. 5794–5799.

12. Li H., Yang C., Hu Y. et al. An improved reduced-order model of an electric pitch drive system for wind turbine control system design and simulation. *Renewable Energy*, 2016, vol. 93, pp. 188–200.

13. Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Shandarova E.B. et al. Mathematical model for the power supply system of an autonomous object with an AC power transmission over a cable rope. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177(1), no. 012073, pp. 1–7.

14. Rotach V.I.A. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia teploenergeticheskimi protsessami: Uchebnik dlia vuzov [Theory of automatic control of heat and power processes: Textbook for high schools]. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 296 p.

15. Fafurin V.A. Avtomatizatsiia tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv laboratornyi praktikum [Automation of technological processes and productions: laboratory practice] / V.A. Fafurin, I.N. Teriushov. Kazan, Izd-vo Kazan. Gos. Tekhnol. un-та, 2008. 552 p.

16. Rutkovskiy A.L., Matveyeva L.I., Kozachek G.V. Optimization of factors of transmission function, got by modified method by Simoyu according to the experimental skim connection feature. Bulletin of Voronezh state technical University, 2010, vol. 6, no. 3, pp. 138–141 (In Russ.).

17. Makarov I.M., Menskii B.M. Lineinye avtomaticheskies sistemy (elementy teorii metody rascheta i spravochnyi material) [Linear automatic systems (theory elements, calculation methods and reference material)]. Moscow, Mashinostroenie, 1982. 504 p.

18. Aivazian S.A. Metody ekonometriki [Methods of Econometrics]. Moscow, Magistr, 2010. 512 p.

Viktor M. Rulevskiy

Candidate of Technical Sciences, Director,
Research Institute of Automation and Electromechanics,
Tomsk State University of Control Systems and
Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9229-8611>
Phone: +7-906-950-04-01
Email: rulevsky@niiiaem.tomsk.ru

Viktor G. Bukreev

Doctor of Technical Sciences, Professor,
School of Energy & Power Engineering, National Research
Tomsk Polytechnic University (TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>
Phone: +7-913-854-21-96
Email: bukreev@tpu.ru

Elena B. Shandarova

Candidate of Technical Sciences, assistant professor,
School of Energy & Power Engineering, National Research
Tomsk Polytechnic University (TPU)
30, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>
Phone: +7-913-811-98-26
Email: shandarovaelena@mail.ru

УДК 621.3.078.4

А.В. Шкуратов, А.В. Петровский

Формирователь аналоговых вольт-амперных характеристик для имитатора солнечной батареи

Предлагается формирователь опорных вольт-амперных характеристик для имитаторов солнечных батарей на основе аппроксимации прямой ветви $p-n$ -перехода. Приведены результаты моделирования, представлены доверительные интервалы переменных, при которых обеспечивается оптимальная погрешность воспроизведения вольт-амперной характеристики. Приведенный метод позволяет создавать надежные имитаторы солнечных батарей с погрешностью воспроизведения точки максимального отбора мощности не более 10%.

Ключевые слова: имитатор, солнечная батарея, вольт-амперная характеристика.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-93-97

Современные тенденции увеличения мощности бортового электрооборудования (до 12–15 кВт) и срока активного существования (до 10–15 лет) космических аппаратов привели к повышению требований, предъявляемых к системам электропитания [1, 2]. Исходя из этого, необходим комплекс решений при проектировании и отработке энергопреобразующей аппаратуры. Для достижения поставленных задач используется специализированное оборудование, которое обладает высокой надежностью и удовлетворяет современным требованиям по эффективности и электромагнитной совместимости. Вместе с тем для полной физической имитации технических характеристик бортовых источников энергии нужны большие затраты средств. Например, применение солнечных панелей в качестве первичных генераторов электрической энергии в наземных условиях требует наличия больших помещений и специальных стендовых устройств, обеспечивающих имитацию заданных условий освещенности и температур.

В связи с этим наряду с физическим моделированием применяется имитационно-физическое моделирование, при котором отдельные компоненты заменяются эквивалентами (имитаторами). При наземных испытаниях системы электропитания космических аппаратов применяются имитаторы солнечных батарей (ИСБ). Для повышения качества наземных испытаний они должны с требуемой точностью воспроизводить вольт-амперные характеристики (ВАХ) реальных солнечных батарей (СБ). Основным элементом ИСБ является формирователь, который предназначен для синтеза опорных ВАХ при заданных значениях температуры, освещенности и т.д.

Различают две техники генерирования опорных ВАХ: аналоговую [3–5] и цифровую [6–8]. Имитаторы с цифровым синтезом позволяют воспроизводить ВАХ с высокой точностью; также они обладают хорошей температурной стабильностью и гибкостью управления. Основным недостатком цифрового синтеза опорных ВАХ являются необходимость использования больших вычислительных ресурсов.

Имитаторы на аналоговой основе известны простотой и низким ценовым исполнением. Их ВАХ могут быть получены несколькими способами:

– с помощью фотопреобразователей малой мощности с источником света [9]. Данный метод позволяет имитировать солнечные батареи в реальном времени, самый точный из других методов, что обусловлено применением реальных солнечных панелей. Влияние внешних факторов (освещенность, температура) формируется с помощью стендов. Несмотря на это, он наиболее затратный и труднореализуемый;

– использованием светодиода и фотодиода [10, 11]. Данный метод гибок и служит для имитирования состояния затенения, однако его реализация связана с трудностями, вызванными стабильностью генерирования ВАХ и ее управлением;

– применением параметрических уравнений полупроводниковых компонентов [12–14]. ИСБ, основанные на параметрических уравнениях полупроводниковых компонентов, позволяют создавать относительно простые генераторы опорных ВАХ с ограниченным набором кривых.

Предложен формирователь опорных ВАХ для ИСБ, основанный на аппроксимации прямых ветвей $p-n$ -переходов матрицы полупроводниковых диодов, позволяющий формировать ВАХ при широком диапазоне изменения их параметров.

Описание и модель управления

ВАХ СБ можно разделить на три участка (рис. 1): режим стабилизации тока (AB), нелинейный участок (BC), режим стабилизации напряжения (CD). Предлагаемая структура формирователя ВАХ СБ (рис. 2) состоит из масштабирующего усилителя, диодной матрицы, формирователя наклона для участка CD (коэффициент наклона K_2) и устройства токовой отсечки. Формирователь ВАХ рассчитан для работы по схеме стабилизатора тока с функциональной связью по напряжению. Выходное напряжение ИСБ поступает на масштабирующий усилитель с коэффициентом усиления K_1 . Формирователь наклона предназначен для имитации последовательного сопротивления СБ. Устройство токовой отсечки разделяет режимы работы формирователя и имеет связь с диодной матрицей. На выходе формирователя ВАХ происходит вычитание сигнала с выходов диодной матрицы (с коэффициентом K_3) и выходного сигнала устройства токовой отсечки из опорного сигнала $I_{к.з.}$, пропорционального току короткого замыкания.

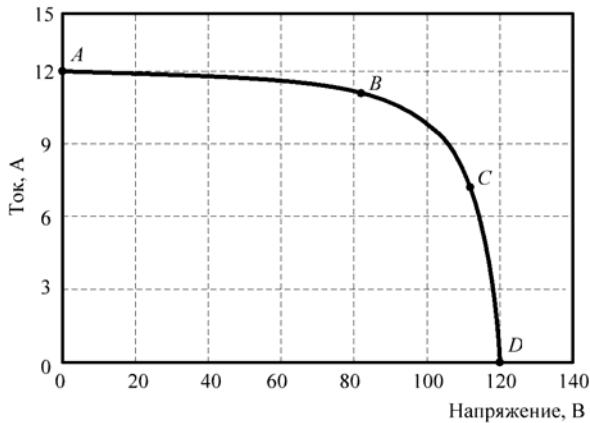


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи

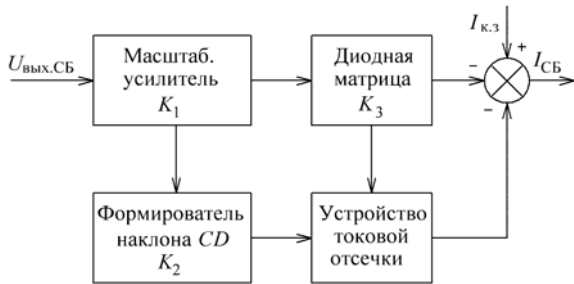


Рис. 2. Структурная схема предложенного формирователя ВАХ

Согласно рис. 2 выходной ток СБ можно определить по выражению

$$I_{СБ} = I_{к.з} - K_2 K_1 U_{вых.СБ} - K_3 (K_1 U_{вых.СБ} - I_{sh}), \quad (1)$$

где I_{sh} – ток через полупроводниковую диодную матрицу, определяемый из уравнения Шокли для идеального диода.

Приведенная формула неудобна для расчета получившейся ВАХ СБ. Реально для задания ВАХ СБ используются три параметра:

- ток короткого замыкания $I_{к.з.}$;
- напряжение холостого хода $U_{х.х.}$;
- максимальная мощность СБ ($I_{опт.}$, $U_{опт.}$).

Кроме этого, реальная ВАХ прямо смещенного перехода полупроводникового диода может отличаться от теоретической, а параметры диодов даже одной партии могут быть различными, при использовании диодной матрицы количество $p-n$ -переходов возрастает и увеличивается ошибка общего характеристического уравнения.

Результаты моделирования (рис. 3) показали, что ВАХ с равными наклонами (коэффициентами K_2 , K_3) при использовании равного количества диодов в схеме диодной матрицы на участке источника тока и участке источника напряжения лежат на одной прямой с коэффициентами, пропорциональными K_2 и K_3 .

Таким образом, точки максимальной мощности для серий ВАХ лежат на прямой a (рис. 3), описанной выражением

$$I = \frac{K_3 \Delta I_{к.з} - K_2 K_3 \Delta U_{х.х}}{K_3 \Delta U_{х.х} - \Delta I_{к.з}} U + I_{к.з.1} - K_2 \frac{I_{к.з.1} - K_3 U_{х.х.1}}{K_2 - K_3}$$

$$\frac{I_{к.з.1} - K_3 U_{х.х.1}}{K_2 - K_3}, \quad (2)$$

где $\Delta I_{к.з} = I_{к.з.2} - I_{к.з.1}$, $\Delta U_{х.х} = U_{х.х.2} - U_{х.х.1}$, $I_{к.з.1}$, $I_{к.з.2}$, $U_{х.х.1}$, $U_{х.х.2}$ – токи короткого замыкания и напряжения холостого хода калибровочных кривых 1 и 2 соответственно.

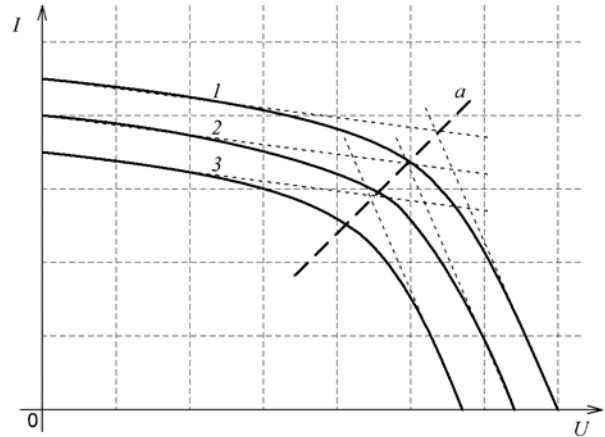


Рис. 3. Семейство ВАХ с $K_{2,1} = K_{2,2} = K_{2,3}$, $K_{3,1} = K_{3,2} = K_{3,3}$

Экспериментальным путем находится положение оптимальной рабочей точки калибровочных ВАХ и, соответственно, исходя из выражения (2), вытекающего из того, что точки лежат на одной прямой, можно найти соотношение коэффициентов K_2 и K_3 из уравнений

$$\begin{cases} \frac{I_{опт(к)}}{I_{к.з(к)}} = \frac{I_{опт(р)}}{I_{к.з(р)}}, \\ \frac{U_{опт(к)}}{U_{х.х(к)}} = \frac{U_{опт(р)}}{U_{х.х(р)}}, \end{cases}$$

где $X_{(к)}$ – параметры кривых при калибровке; $X_{(р)}$ – заданные параметры ВАХ.

Моделирование

Для подтверждения теоретических расчетов проведено моделирование формирователя ВАХ в статическом режиме по схеме управляемого источника тока с функциональной связью по напряжению [13].

Ошибка воспроизведения серии ВАХ (рис. 4) рассчитывается по формуле

$$SSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{опт.эксп(i)}}{P_{опт.теор(i)}} \right)^2}}{n},$$

где $P_{опт.эксп(i)}$ – экспериментальное значение мощности в оптимальной рабочей точке i -й ВАХ; $P_{опт.теор(i)}$ – теоретическое значение мощности в оптимальной рабочей точке i -й ВАХ; n – количество экспериментально снятых ВАХ.

Согласно рис. 4 минимальная ошибка воспроизведения набора ВАХ, выраженных математической моделью (3), достигается при точке калибровки с относительными координатами $(U_{опт}/U_{х.х.}; I_{опт}/I_{к.з.}) = (0,8; 0,85)$ при шагах калибровки по оси тока и оси напряжения не более $0,05 U_{опт}/U_{х.х.}$ и $0,05 I_{опт}/I_{к.з.}$ соответственно.

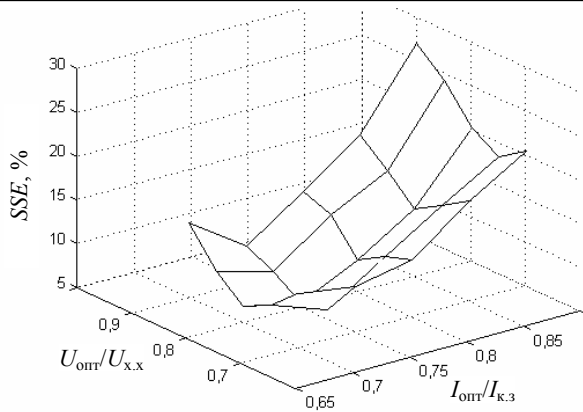


Рис. 4. Среднеквадратичная ошибка воспроизведения серий ВАХ при различных точках калибровки

$$I(U) = I_{к.3}(1 - e^{-A}), \tag{3}$$

где $A = \left(\frac{U}{U_{x.x}} - 1 \right) \ln \left(1 - \frac{I_{опт}}{I_{к.3}} \right) / \left(\frac{U_{опт}}{U_{x.x}} - 1 \right)$;

$$U(I) = U_{x.x} \left(\frac{\left(\frac{U_{опт}}{U_{x.x}} - 1 \right) \cdot \ln \left(1 - \frac{I}{I_{к.3}} \right)}{\ln \left(1 - \frac{I_{опт}}{I_{к.3}} \right)} + 1 \right). \tag{4}$$

На графике относительной погрешности воспроизведения оптимальной рабочей точки набора ВАХ (рис. 5, а) при изменении напряжения и тока в

точке максимального отбора мощности в диапазоне $[0,6U_{x.x} - 0,95U_{x.x}]$ и $[0,6I_{к.3} - 0,95I_{к.3}]$ соответственно видно, что погрешность достигает минимума при положении оптимальной рабочей точки вблизи зоны калибровки. В области, удаленной от точки калибровки на шаги $0,05U_{опт}/U_{x.x}$ и $0,05I_{опт}/I_{к.3}$, она не превышает 2%, на шаги $0,1U_{опт}/U_{x.x}$ и $0,1I_{опт}/I_{к.3}$ – 4%, на шаги $0,15U_{опт}/U_{x.x}$ и $0,15I_{опт}/I_{к.3}$ – 7%. Максимальные отклонения тока (рис. 5, б) и напряжения (рис. 5, в) при воспроизведении набора ВАХ относительно идеальной вычисляются по формулам (3) и (4) соответственно.

Минимальная погрешность воспроизведения на участке стабилизации тока достигается на сериях ВАХ с параметром $U_{опт}/U_{x.x} = 0,75$, а минимальная погрешность воспроизведения на участке стабилизации напряжения – в сериях ВАХ с параметром $I_{опт}/I_{к.3} = 0,7$.

На графике зависимости погрешности воспроизведения оптимальной рабочей точки от температуры $p-n$ -перехода в диапазоне от 273 до 333 К (рис. 6) минимальная погрешность достигается в точке калибровки (297 К) и изменяется по параболическому закону при изменении температуры. Уменьшить температурный уход формирователя ВАХ можно несколькими методами: калибровкой на узких температурных диапазонах, термостабилизацией цепи обратной связи либо введением компенсирующих коэффициентов.

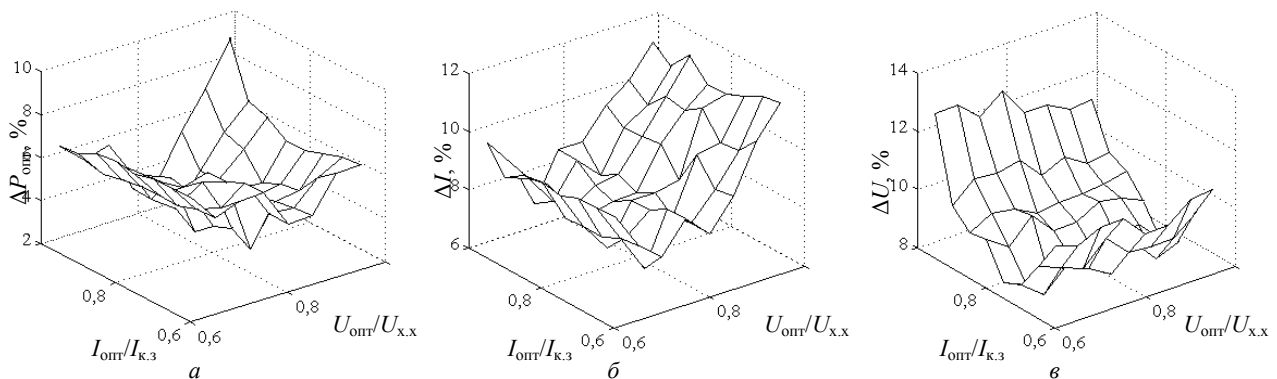


Рис. 5. Относительная погрешность воспроизведения: а – оптимальной мощности; б – тока в режиме максимального отбора мощности; в – напряжения в режиме максимального отбора мощности

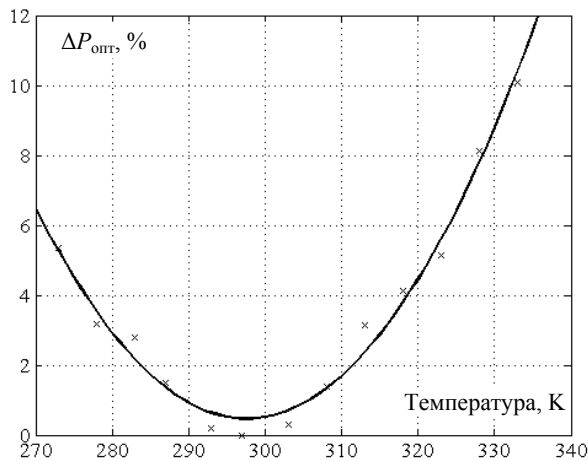


Рис. 6. Погрешность воспроизведения ВАХ СБ при изменении температуры

Заключение

Рассмотрен формирователь вольт-амперных характеристик солнечной батареи на аппроксимации прямых ветвей $p-n$ -переходов матрицы полупроводниковых диодов.

Результаты моделирования показали ошибку воспроизведения точки максимального отбора мощности не более 10% при изменении положения точки максимального отбора мощности на 30% по шкале тока и напряжения от точки калибровки. К недостаткам данной структуры относятся большие отклонения воспроизводимой ВАХ на участках стабилизации тока и напряжения.

Литература

1. Кудряшов В.С. Современное состояние и перспективы развития бортовых СЭП связанных ИСЗ / В.С. Куд-

ряшов, В.В. Хартов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. трудов НПЦ «Полус». – Томск: МГП «РАСКО» при изд-ве «Радио и связь», 2001. – С. 17–27.

2. Чечин А.В. Анализ технических требований к системам электропитания автоматических космических аппаратов / А.В. Чечин, В.И. Пушкин, А.С. Гуртов, А.Н. Филатов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. трудов НПЦ «Полус». – Томск: МГП «РАСКО» при изд-ве «Радио и связь», 2001. – С. 59–66.

3. Design and implementation of a solar array simulator / W. Kui, L. Yongdong, R. Jianye, S. Min // Proc. ICEMS Int. Conf. – 2008. – P. 2633–2636.

4. Wandhare R.G. A low cost light weight and accurate photovoltaic emulator / R.G. Wandhare, V. Agarwal // 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – 2011. – P. 1887–1892.

5. Koran A. High Efficiency photovoltaic source simulator with fast response time for solar power conditioning system evaluation / A. Koran, T. LaBella, J. Lai // Power Electronics IEEE Transactions. – 2014. – Vol. 29, № 3. – P. 1285–1297.

6. Koutroulis E. Development of an FPGA-based system for real-time simulation of photovoltaic modules / E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, V. Tzitzilonis // Proc. IEEE RSP Conf. – 2006. – P. 200–208.

7. Singh A. Design and implementation of a programmable solar photovoltaic simulator / A. Singh, A.R. Hota, A. Patra // Proc. IEEE ICPES Conf. – 2010. – P. 1–5.

8. Park M. A novel real-time simulation technique of photovoltaic generation systems using RTDS / M. Park, I. Yu // IEEE Trans. Energy Convers. – 2004. – Vol. 19. – P. 164–169.

9. Midtgard O.M. A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics // Proc. Eur. Conf. Power Electron Appl. – 2007. – P. 1–10.

10. Nagayoshi H. Characterization of the module/array simulator using I-V magnifier circuit of a pn photo-sensor // Proc. 3rd World Conf. on Photovolt. Energy Conv. – 2003. – Vol. 2. – P. 2023–2026.

11. Esen V. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review / V. Esen, S. Saglam, B. Oral // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 77. – P. 1024–1250.

12. Design of a photovoltaic simulator with a novel reference signal generator and two-stage LC output filter / A. Koran, K. Sano, R. Kim, J. Lai // Power Electronics IEEE Transactions. – 2010. – Vol. 25, № 5. – P. 1331–1338.

13. Nagayoshi H. Partial shading effect emulation using multismall scale module simulator units / H. Nagayoshi, M. Atesh // Proc. 31st IEEE Photovolt. Spec. Conf. – 2005. – P. 1710–1713.

14. Ldloyd S. Design and construction of a modular electronic photovoltaic simulator / S. Ldloyd, G. Smith, D. Infield // Proc. Inst. Electr. Eng. Power Electr. Variable Speed Drives Conf. – 2000. – P. 120–123.

15. Мизрах Е.А. О синтезе адмитансных частотных характеристик имитатора солнечной батареи / Е.А. Мизрах, А.С. Сидоров, Р.Б. Балакирев // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2008. – Вып. 6. – С. 24–28.

Шкуратов Антон Валерьевич

Инженер-конструктор АО «НПЦ «Полус»
Кирова пр., д. 56в, г. Томск, Россия, 634041
Тел.: +7-923-415-42-61
Эл. почта: kft_veritas@mail.ru

Петровский Андрей Валерьевич

Инженер-программист АО «НПЦ «Полус»
Кирова пр., д. 56в, г. Томск, Россия, 634041
Тел.: +7-913-889-96-80
Эл. почта: avp168@mail.ru

Shkuratov A.V., Petrovsky A.V.

Analog base IV-former for Solar Array Simulator

A shaper of the reference volt-ampere characteristics for solar cell simulators based on the approximation of the direct branch of the p – n junction is proposed. The simulation results are presented, the confidence intervals of the variables are presented, at which the optimum error of reproduction of the current-voltage characteristic is ensured. Proposed method allows creating reliable solar array simulators with maximum power point error less than 10%.

Keywords: simulator, solar battery, current-voltage characteristic.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-93-97

References

1. Kudryashov V.S., Khartov V.V. Current state and development prospects airborne SPS grid connected AES. *Electronic and electromechanical systems and devices*: Proc. of scient. papers SRC «Polus», Tomsk, 2001, pp. 17–27 (In Russ.).

2. Chechin A.V., Pushkin V.I., Gurtov A.S., Filatov A.N. Technical requirements analysis by spacecrafts power systems *Electronic and electromechanical systems and devices*: Proc. of scient. papers SRC «Polus», Tomsk, 2001, pp. 59–66 (In Russ.).

3. Kui W., Yongdong L., Jianye R., Min S. Design and implementation of a solar array simulator. Proc. ICEMS Int. Conf., 2008, pp. 2633–2636.

4. Wandhare R.G., Agarwal V. A low cost light weight and accurate photovoltaic emulator. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2011, pp. 1887–1892.

5. Koran A., LaBella T., Lai J. High Efficiency photovoltaic source simulator with fast response time for solar power conditioning system evaluation. *Power Electronics IEEE Transactions*, 2014, vol. 29, no. 3, pp. 1285–1297.

6. Koutroulis E., Kalaitzakis K., Tzitzilonis V. Development of an FPGA-based system for real-time simulation of photovoltaic modules. Proc. IEEE RSP Conf., 2006, pp. 200–208.

7. Singh A., Hota A. R., Patra A. Design and implementation of a programmable solar photovoltaic simulator. Proc. IEEE ICPES Conf., 2010, pp. 1–5.

8. Park M., Yu I. A novel real-time simulation technique of photovoltaic generation systems using RTDS. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2004, vol. 19, pp. 164–169.

9. Midtgard O. M. A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics. Proc. Eur. Conf. Power Electron Appl., 2007, pp. 1–10.

10. Nagayoshi H. Characterization of the module/array simulator using I-V magnifier circuit of a pn photo-sensor. Proc. 3rd World Conf. on Photovolt. Energy Conv., 2003, vol. 2, pp. 2023–2026.

11. Esen V., Saglam S., Oral B. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 77, pp. 1024–1250.

12. Koran A., Sano K., Kim R., Lai J. Design of a photovoltaic simulator with a novel reference signal generator and two-stage LC output filter. *Power Electronics IEEE Transactions*, 2010, vol. 25, no. 5, pp. 1331–1338.

13. Nagayoshi H., Atesh M. Partial shading effect emulation using multismall scale module simulator units. Proc. 31st IEEE Photovolt. Spec. Conf., 2005, pp. 1710–1713.

14. Ldloyd S., Smith G., Infield D. Design and construction of a modular electronic photovoltaic simulator. Proc. Inst. Electr. Eng. Power Electr. Variable Speed Drives Conf., 2000, pp. 120–123.

15. Mizrakh E.A., Sidorov A.S., Balakirev R.B. Upon the photovoltaic array simulator admittance-frequency response synthesis. *Scientific Journal of Science and Technology*. Krasnoyarsk, 2008, vol. 6, pp. 24–28 (In Russ.).

Anton V. Shkuratov

Engineer, SRC «Polus»

56v, Kirova pr., Tomsk, Russia, 634041

Phone: +7-923-415-42-61

Email: kft_veritas@mail.ru

Andrew V. Petrovsky

Engineer, SRC «Polus»

56v, Kirova pr., Tomsk, Russia, 634041

Phone: +7-913-889-96-80

Email: avp168@mail.ru

УДК 629.78.064.5

М.В. Нестеришин, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев

Сравнительный анализ энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с параллельным и последовательным регулятором мощности солнечной батареи

Приводится сравнение последовательного и параллельного регулятора мощности солнечной батареи. Представлен сравнительный анализ энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с параллельным и последовательным регулятором мощности солнечной батареи, в том числе с использованием экстремального регулятора мощности. Анализ показал, что энергетические характеристики системы электропитания на базе энергопреобразующей аппаратуры с последовательным регулятором мощности с применением экстремального регулятора мощности солнечной батареи эквивалентны энергетическим характеристикам системы электропитания на базе энергопреобразующей аппаратуры с параллельным регулятором солнечной батареи для применения на геостационарной орбите. Применение экстремального регулятора мощности для последовательного регулятора дает выигрыш по площади солнечной батареи 1 м^2 по уровню выходной мощности 6 кВт при прочих равных условиях.

Ключевые слова: энергопреобразующая аппаратура, последовательный регулятор, параллельный регулятор, экстремальный регулятор мощности, система электропитания космического аппарата.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-98-102

В настоящее время при разработке систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) применяется энергопреобразующая аппаратура (ЭПА) как с параллельным, так и последовательным регулятором мощности солнечной батареи (БС) [1–5].

Выбор типа регулятора мощности БС в энергопреобразующей аппаратуре ЭПА осуществляется по критерию энергетической эффективности [6]. Для оценки энергетической эффективности регулятора БС используется коэффициент передачи мощности БС, который представляет собой отношение мощности, которая передается на выходные шины ЭПА, к входной мощности ЭПА (выходной мощности БС) за вычетом не зависящего от выходной мощности собственного потребления ЭПА.

Результаты оценки энергетической эффективности рассматриваемых типов регуляторов БС предыдущего поколения и принятые на ее основе правила преимущественного применения ЭПА с регулятором параллельного и последовательного типов следующие:

- коэффициент передачи мощности БС параллельного регулятора ($\sim 1,0$) выше, чем последовательного ($\sim 0,92 \div 0,94$);
- параллельный регулятор имеет безусловное преимущество для применения на КА с большой мощностью нагрузки, эксплуатирующийся на геостационарной орбите (ГСО – круговая орбита высотой 36000 км , плоскость орбиты совпадает с плоскостью эклиптики) [7, 8];
- последовательный регулятор следует применять на низкокруговой орбите (НКО – круговая орбита высотой до 1500 км), высокоэллиптической орбите (ВЭО – эллиптическая орбита с высотой апогея около 40000 км и перигея – 500 км) и высококруговой орбите (ВКО – круговая орбита высотой около 20000 км), с переменной освещенностью и, следовательно, с переменной температурой БС, с использо-

ванием экстремального регулятора мощности (ЭРМ) БС, на КА малой и средней мощности, где отводить относительно большие потери ($6\text{--}8\%$) не представляет технических проблем.

Рассмотрим далее эволюцию схем последовательного и параллельного регулятора, применяемых для регулирования мощности БС. На рис. 1 приведена схема параллельного (а) и последовательного (б) регуляторов предыдущего поколения.

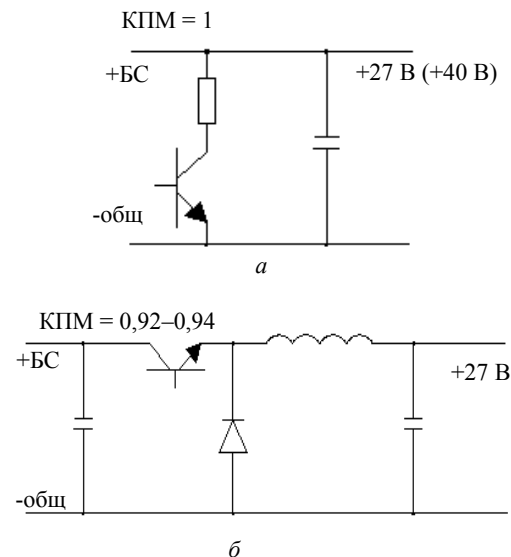


Рис. 1. Схемы для регулирования мощности БС предыдущего поколения

На рис. 2 приведена схема параллельного (а) и последовательного (б) регуляторов, применяемых в настоящее время.

Авторами по методике, приведенной в [9], проведено определение коэффициента передачи мощности от солнечной батареи в нагрузку ЭПА различных разработчиков (Thales Alenia Space, АО «ИСС»,

АО «НПЦ «Полус»). Образец ЭПА ИП №1: завершение ОКР в 2012 г., разработчик Thales Alenia Space, номинал выходной шины 100 В (15 кВт), параллельный регулятор мощности БС, ЭРМ отсутствует. Образец ЭПА ОП №2: завершение ОКР в 2013 г., разработчик АО «ИСС», номинал выходных шин 27 В (860 Вт) и 100 В (15 кВт), параллельный регулятор мощности БС, ЭРМ отсутствует. Образец ЭПА ОП №3: завершение ОКР в 2012 г., разработчик АО «ИСС», номинал выходных шин 27 В (860 Вт) и 100 В (5,6 кВт), параллельный регулятор мощности БС, ЭРМ отсутствует. Образец ЭПА ОП №4: завершение ОКР в 2013 г., разработчик АО «НПЦ «Полус», номинал выходных шин 27 В (1200 Вт) и 100 В (4,4 кВт), последовательный регулятор мощности БС, ЭРМ присутствует [10].

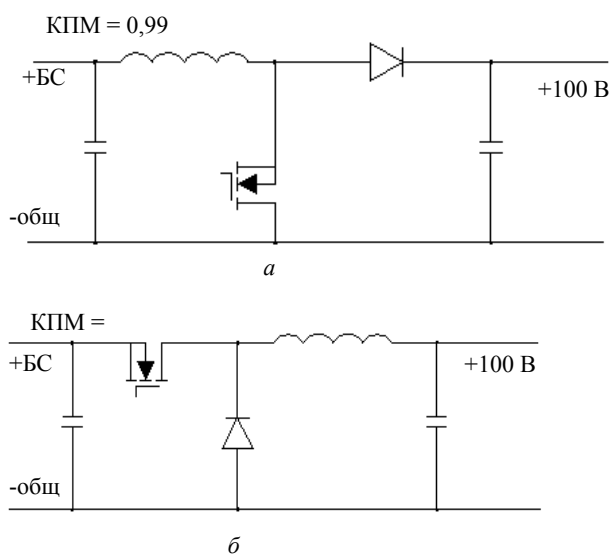


Рис. 2. Схемы для регулирования мощности БС текущего поколения

Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты передачи мощности регулятора БС				
Прибор	ЭПА ИП №1	ЭПА ОП №2	ЭПА ОП №3	ЭПА ОП №4
КПМ	0,989	0,977	0,993	0,978

Как видно из таблицы, в настоящее время коэффициенты передачи мощности параллельного и последовательного регуляторов (от БС до нагрузки) практически идентичны, что обусловлено следующими основными факторами:

- Изменение схемы параллельного регулятора с введением секционного регулирования мощности БС (добавление в последовательную цепь дросселя и диодной развязки – фактически двух диодов для обеспечения надёжности), что привело к появлению потерь в последовательной цепи.

- Изменение номинала основной выходной шины ЭПА с 27 на 100 В, что привело к снижению относительных статических потерь мощности в последовательном регуляторе.

- Замена силовых биполярных транзисторов на полевые транзисторы, что привело к снижению ста-

тических и динамических потерь в последовательном регуляторе [11].

Таким образом, изменение соотношения энергетической эффективности регуляторов БС последовательного и параллельного типа в сторону паритета обусловлено объективными процессами совершенствования применяемой элементной базы и системными изменениями в части внешних интерфейсов и применяемых схемотехнических решений.

Учитывая результаты оценки коэффициента передачи мощности для рассматриваемых типов регуляторов БС (смещение значений в сторону паритета), для разработки критерия применения того или иного типа регулятора БС в ЭПА следует рассмотреть их эффективность с системной точки зрения, т.е. на уровне СЭП КА. Для этого проведен анализ требуемой площади БС для суммарной выходной мощности нагрузки 5,6 кВт при применении последовательного регулятора с экстремальным регулятором мощности БС и параллельного регулятора.

При проведении сравнительного анализа энергетической эффективности систем электропитания должно быть учтено обстоятельство, существенно влияющее на оценку.

Это обстоятельство возникает из следующих объективных факторов:

- Как параллельный, так и последовательный регулятор мощности БС в режиме отбора всей мощности БС (и без реализации функции экстремального регулирования мощности БС) работает при фиксированном напряжении БС. Это фиксированное напряжение незначительно отличается от номинального напряжения выходной шины на величину падения напряжения в прямой цепи ЭПА. Например, в этом режиме для номинала (100±1) В входное напряжение по шине БС составляет ~102÷103 В.

- Это означает, что оптимальное рабочее напряжение БС в худшем случае не должно быть менее этого значения. Естественно, это значение определяется в том числе и с учетом запасов на падение напряжения в силовых шинах и проектных запасов на неопределённости.

- Худшим расчётным случаем для определения проектного значения оптимального рабочего напряжения БС является конец ресурса и весеннее равноденствие (для ГСО). В весеннее равноденствие имеется наибольшее значение коэффициента освещённости (~1,03), а, следовательно, и наибольшая рабочая температура. При этом, как известно, с ростом температуры снижается оптимальное рабочее напряжение БС.

- Худшим расчётным случаем для определения проектного значения минимальной площади БС для обеспечения положительного энергобаланса является случай летнего солнцестояния. Это происходит по следующим причинам:

- Требования по необходимой мощности заряда, для компенсации разряда АБ только во время работы плазменного двигателя в период солнцестояния существенно меньше, чем для периода равно-

денствия для компенсации разряда АБ при прохождении теней Земли. Эти значения составляют ~200 и 800–1,200 Вт соответственно, что эквивалентно разнице в требуемой площади БС на ~2–3 м².

– Но эти меньшие требования по мощности БС должны обеспечиваться в существенно худших условиях освещенности. Баллистический коэффициент освещенности составляет 0,885 и 0,989 для летнего солнцестояния и весеннего равноденствия. А это эквивалентно увеличению требуемой площади БС на ~4–5 м².

– То есть, несмотря на то, что в период солнцестояния требуется меньшая мощность БС, чем в период равноденствия, для обеспечения этой меньшей мощности требуется большая площадь БС из-за худшей фактической освещенности в солнцестоянии.

Таким образом, объективно возникает ситуация, когда минимальное значение оптимального рабочего напряжения БС определяют условия весеннего равноденствия, а минимальную площадь БС – условия летнего солнцестояния.

А это естественным образом приводит к тому, что в период летнего солнцестояния оптимальное напряжение БС заметно выше требуемого для ЭПА минимального входного напряжения. Это происходит из-за более низкой температуры БС в период летнего солнцестояния, которая соответствует более низкой освещенности.

Иными словами, для условий эксплуатации на ГСО и в период равноденствия, и в период солнцестояния существует избыток фактической мощности БС, относительно минимально необходимой расчетной мощности.

В период равноденствия – из-за избытка площади БС, минимальное значение которой определяется условиями солнцестояния.

В период солнцестояния – из-за избытка напряжения БС в точке максимальной мощности, минимальное значение которого определяется условиями равноденствия.

По результатам анализа параметров БС, выполненных разработчиком, при обеспечении оптимального рабочего напряжения БС в период весеннего равноденствия не менее 105 В, оптимальное рабочее напряжение БС в период летнего солнцестояния составит не менее ~110 В.

Таким образом, для худшего случая, определяющего минимальную площадь БС, БС имеет мощность в оптимальной рабочей точке не менее чем на 4% больше, чем при работе при фиксированном рабочем напряжении. И этот избыток не может быть использован ЭПА без реализации функции экстремального регулирования мощности БС.

Из изложенного выше следует, что реализация функции экстремального регулирования мощности БС должна несколько уменьшить площадь БС, требуемую для обеспечения энергобаланса КА на ГСО [12, 13].

При этом все известные типы ЭПА с последовательным регулятором мощности БС традиционно, на протяжении уже более 30 лет, оснащаются конту-

ром экстремального регулирования мощности БС. Опыт эксплуатации в полёте подтвердил его эффективность и надёжность. Принятые и реализованные в ЭПА с параллельным регулятором решения не имеют возможности обеспечить экстремальное регулирование мощности БС.

Анализ проведён из условия реализации ЭРМ БС только для последовательного регулятора, поскольку энергетические параметры ЭПА с параллельным регулированием и реализованным ЭРМ неизвестны.

Для сравнительного анализа полученных значений КПМ в [14] и собственного потребления ЭПА проведен расчет нулевого суточного (виткового) энергобаланса по тестовой циклограмме потребления на ГСО (теневой участок Земли (ТУЗ) – 1,2 ч в равноденствие, режим коррекции удержания (РКУ) – 3 ч ежесуточно) [15]. Исходные данные по мощности потребления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные по мощности потребления		
ЭПА, кВт	ЭПА ОП №3	ЭПА ОП №4
Выходная мощность по шине 100 В	5	
Дополнительное потребление в РКУ	1,5	
Выходная мощность по шине 27 В	0,6	

Расчет параметров БС и АБ проводится для летнего солнцестояния и весеннего равноденствия. В расчете учитываются падения напряжения в кабелях БС – ЭПА (КПМ БКС 0,97) и АБ – ЭПА (КПМ БКС 0,99), а также энергетический коэффициент АБ по циклу заряд-разряд (0,87).

В табл. 3 приведены результаты расчета для летнего солнцестояния.

Таблица 3

Результаты расчета для летнего солнцестояния					
ЭПА	$P_{БС}$	$S_{БС}, м^2$	$E_{ЗАР}$	$E_{РАЗ}$	$P_{ЭПА}$
ЭПА ОП №3	6,23	28,2	4,55	3,96	230
ЭПА ОП №4 без ЭРМ	6,24	28,2	4,54	3,95	240
ЭПА ОП №4 с ЭРМ	6,24	27,1	4,54	3,95	240

В таблице обозначено:

$P_{БС}$ – минимально необходимая мощность БС для обеспечения нулевого виткового (суточного) энергобаланса [кВт];

$S_{БС}$ – площадь БС, соответствующая минимально необходимой мощности БС [м²];

$E_{ЗАР}$ – витковая зарядная энергия АБ [кВт×ч];

$E_{РАЗ}$ – витковая разрядная энергия АБ [кВт×ч];

$P_{ЭПА}$ – средняя мощность тепловыделения ЭПА за виток (потери) [Вт].

В табл. 4 приведены результаты расчета для весеннего равноденствия.

В таблице обозначено: $E_{РАЗ ТУЗ}$ – разрядная энергия АБ при прохождении ТУЗ, кВт×ч; $E_{РАЗ РКУ}$ – разрядная энергия АБ при проведении РКУ, кВт×ч.

Таблица 4

Результаты расчета для весеннего равноденствия

ЭПА	$P_{БС}$	$S_{БС}, м^2$	$E_{ЗАР}$	$E_{РАЗ\ ТУЗ}$	$E_{РАЗ\ РКУ}$	$E_{РАЗ}$	$P_{ЭПА}$
ЭПА ОП №3	6,64	26,8	11,45	7,21	2,75	9,97	255
ЭПА ОП №4	6,64	26,8	11,34	7,08	2,79	9,87	260

В табл. 5 приведены значения мощности БС и требуемая энергоёмкость комплекта АБ с 5%-ным запасом для обеспечения положительного виткового энергобаланса как в весеннее равноденствие, так и в летнее солнцестояние.

Таблица 5

Параметры для обеспечения положительного энергобаланса

ЭПА	$P_{БС}, кВт$	$S_{БС}, м^2$	$E_{АБ}, кВт \times ч$
ЭПА ОП №3	7,40	29,6	7,60
ЭПА ОП №4 без ЭРМ	7,45	29,8	7,45
ЭПА ОП №4 с ЭРМ	7,15	28,6	7,45

То есть площадь БС, минимально необходимая для обеспечения положительного энергобаланса во все сезоны, для данного расчётного случая (при использовании ЭРМ БС) уменьшается на $\sim 1 м^2$ ($\sim 4\%$).

В результате оценки энергетической эффективности ЭПА с регулятором БС последовательного и параллельного типа показано следующее:

1. За счёт применения ЭРМ БС в ЭПА с последовательным регулятором БС энергетические характеристики СЭП на её базе как минимум не хуже, чем энергетические характеристики СЭП на базе ЭПА с параллельным регулятором БС. Кроме того, эти типы ЭПА как минимум эквивалентны для применения на мощных КА на ГСО, а как максимум за счёт применения ЭПА с последовательным регулятором мощности БС и ЭРМ достигается выигрыш по требуемой площади БС.

2. Уровень предпочтительности применения ЭПА с последовательным регулятором и ЭРМ БС в СЭП КА на НКО, ВЭО и ВКО с широким диапазоном уровней освещенности/температуры БС, а также с существенной неопределённостью радиационной деградации – ещё более упрочился.

Таким образом, поскольку по критерию энергетической эффективности СЭП на базе ЭПА с обоими типами регуляторов практически эквивалентны, выбор типа регулятора БС в ЭПА при разработке КА следует осуществлять по второму критерию – удельной мощности ЭПА [Вт/кг]. Далее должны учитываться критерии второго порядка – отработанность схемотехнических решений, степень наземной и летной квалификации оборудования и т.д.

Литература

1. Patel M.R. Spacecraft power systems. – New York: CRC Press, 2005. – 734 p.
2. Ley W. Handbook of Space Technology / W. Ley, K. Wittmann, W. Hallmann. – New York: Wiley & Sons, 2009. – 906 p.
3. Аникин А.С. Электропитание космических аппаратов: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2014. – 177 с.

4. Чеботарев В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие / В.Е. Чеботарев, В.Е. Косенко. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. – С. 334–340.

5. Шиняков Ю.А. Энергетический анализ структурных схем систем электроснабжения автоматических космических аппаратов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 152–155.

6. Соустин Б.П. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Исляев // Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская изд. фирма, 1994. – 318 с.

7. Кудряшов В.С. Концепция бортовой системы электроснабжения связного геостационарного ИСЗ / В.С. Кудряшов, Ш.Н. Исляев // Системы электроснабжения и электромеханические устройства. – Т. 1: Аппаратура управления и преобразования: сб. науч. трудов НПО «Полус». – Томск, 1992. – С. 17–24.

8. O'Sullivan D. The Sequential Switching Shunt Regulator S3R / D. O'Sullivan, A. Weunberg // Proc. Of the 3rd ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar. Noordwijk, Netherlands. – 1977. – P. 123–131.

9. Нестеришин М.В. Методика оценки энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов / М.В. Нестеришин, В.Г. Букреев, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 112–118.

10. Козлов Р.В. Сравнительный анализ энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с последовательным и параллельным регулятором мощности БС / Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12–13 апреля 2018 г.), АО «НПП «Полус». – Томск, 2018. – С. 6–9.

11. Erickson R.W. Fundamentals of power electronics / R.W. Erickson, D. Maksimovic. New York: Kluwer Academic. – Plenum Publishers, 2001. – 881 p.

12. Femina N. Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems / N. Femina, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli. – London: CRC Press, 2013. – 355 p.

13. Hyder A.K. Spacecraft Power Technologies. – London: Imperial College Press/World Scientific Publishing, 2003. – 492 p.

14. Нестеришин М.В. Методика определения энергетических параметров энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космических аппаратов / М.В. Нестеришин, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Решетневские чтения: матер. XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем акад. М.Ф. Решетнева (08–11 нояб., г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова. – Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2017. – Ч. 1. – С. 302–303.

15. Macdonald M. The International Handbook of Space Technology / M. Macdonald, V. Badescu. – Berlin: Springer-Verlag, 2014. – 728 p.

Нестеришин Михаил Владленович

Начальник отд. бортовых систем электропитания космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева
Ленина ул., д. 52, г. Железногорск, Россия, 692972
Тел.: +7 (391-9) 76-41-57
Эл. почта: Micky_nest@iss-reshetnev.ru

Козлов Роман Викторович

Начальник группы отд. бортовых систем электропитания космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева
Ленина ул., д. 52, г. Железногорск, Россия, 692972
Тел.: +7 (391-9) 76-41-57
Эл. почта: krv@iss-reshetnev.ru

Журавлев Александр Викторович

Инженер-конструктор отд. бортовых систем электропитания космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева
Ленина ул., д. 52, г. Железногорск, Россия, 692972
Тел.: +7 (391-9) 76-41-57
Эл. почта: zhuravlev@iss-reshetnev.ru

Nesterishin M.V., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V.

Comparative analysis of energy efficiency of power conditioning units with parallel and serial Solar Array power regulators

This article describes comparison of parallel and serial Solar Array power regulators. It presents the comparative analysis of the energy efficiency of the power conditioning units with parallel and serial Solar Array power regulators, including the max power point tracker usage. The analysis showed that the energy characteristics of the power supply system based on energy conversion equipment with a serial power regulator using an extreme solar battery power regulator are equivalent to the energy characteristics of the power supply system based on energy conversion equipment with a parallel solar battery regulator for geo-stationary orbit. Usage of the max power point tracker with the serial regulator gives gain by 1 m² of Solar Array square at output power level of 6 kW in other equal conditions.

Keywords: power conditioning units, serial regulator, parallel regulator, max power point tracker, spacecraft electric power system.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-98-102

References

1. Patel M.R. *Spacecraft power systems*. New York, CRC Press, 2005, 734 p.
2. Ley W., Wittmann K., Hallmann W. *Handbook of Space Technology*. New York, Wiley & Sons, 2009, 906 p.
3. Anikin A.S. *Elektropitanie kosmicheskikh apparatov: ucheb. posobie*. Tomsk, TUSUR, 2014, 177 p.
4. Chebotarev V.E., Kosenko V.E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informacionnogo obespecheniya: ucheb. posobie*. Krasnoyarsk, Sib. gos. aehrokosmich. un-t, 2011, pp. 334–340.
5. Shinyakov YU.A. Energeticheskij analiz strukturnyh skhem sistem ehlektrosnabzheniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 309, № 8, pp. 152–155.
6. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev SH.N. *Sistemy elektropitanija kosmicheskikh apparatov*. Novosibirsk, VO Nauka., Sibirskaya izd. Firma, 1994, 318 p.
7. Kudryashov V.S., Islyayev SH.N. *Koncepciya bortovoj sistemy elektrosnabzheniya svyaznogo geostacionarnogo ISZ. Sistemy elektrosnabzheniya i preobrazovaniya*. Tomsk, Sb. nauch. trudov NPO Polyus, 1992, pp. 17–24.

8. O'Sullivan D., Weunberg A. The Sequential Switching Shunt Regulator S3R. *Proc. Of the 3rd ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar*. Netherlands. Noordwijk, 1977, pp. 123–131.

9. Nesterishin M.V., Bukreev V.G., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. Metodika ocenki energeticheskoy effektivnosti energopreobrazuyushchej apparatury kosmicheskikh apparatov. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, № 1, pp. 112–118.

10. Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. Sravnitel'nyj analiz energeticheskoy effektivnosti energopreobrazuyushchej apparatury s posledovatel'nym i paralel'nym regulyatorom moshchnosti BS. *Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustrojstva*. Tomsk, AO NPC Polyus, 2018, pp. 6–9.

11. Erickson R.W., Maksimovic D. *Fundamentals of power electronics*. New York, Kluwer Academic. Plenum Publishers, 2001, 881 p.

12. Femina N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. *Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems*. London, CRC Press, 2013, 355 p.

13. Hyder A.K. *Spacecraft Power Technologies*. London, Imperial College Press. World Scientific Publishing, 2003, 492 p.

14. Nesterishin M.V., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. Metodika opredeleniya energeticheskikh parametrov energopreobrazuyushchej apparatury sistemy elektropitanija kosmicheskikh apparatov. *Reshetnevskie chteniya: mater. XXI Mezhdunar. nauch-prakt. konf., posvyashch. pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva*. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetneva, 2017, vol. 1, pp. 302–303.

15. Macdonald M., Badescu V. *The International Handbook of Space Technology*. Berlin, Springer-Verlag, 2014, 728 p.

Mikhail V. Nesterishin

Head of Spacecraft On-board Power Systems Division, Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev «Information Satellite Systems»
52, Lenin st., Zheleznogorsk, Russia, 692972
Phone: +7 (391-9) 76-41-57
Email: Micky_nest@iss-reshetnev.ru

Roman V. Kozlov

Head of Spacecraft On-board Power Systems Division, Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev «Information Satellite Systems»
52, Lenin st., Zheleznogorsk, Russia, 692972
Phone: +7 (391-9) 76-41-57
Email: krv@iss-reshetnev.ru

Alexander V. Zhuravlev

Engineer-designer, Spacecraft On-board Power Systems Division, Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev «Information Satellite Systems»
52, Lenin st., Zheleznogorsk, Russia, 692972
Phone: +7 (391-9) 76-41-57
Email: zhuravlev@iss-reshetnev.ru

УДК 681.532.55

Д.О. Якимовский, Д.С. Положенцев, Д.И. Джукич

Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса

Рассмотрены вопросы создания исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса, характеризующегося высокими требованиями к точности обработки малых скоростей вращения. Представлена структурная схема электропривода, обладающего повышенной чувствительностью к обработке малых скоростей вращения. Приведены результаты макетирования исполнительного электропривода.

Ключевые слова: система управления угловой скоростью, обратная связь по углу, исполнительный электропривод.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-103-108

Силовые гироскопические комплексы (СГК) используются в составе систем управления ориентацией космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Создание современных КА ДЗЗ требует все более высоких точностных и динамических характеристик СГК [1–3].

Режим стабилизации и режим программных поворотов являются основными режимами работы СГК. Режим стабилизации СГК КА характеризуется низкими задаваемыми угловыми скоростями вращения ПГ, которые могут быть на уровне сотых и даже тысячных долей градуса в секунду, и высокими требованиями к точности их обработки. Режим программных поворотов СГК КА характеризуется задаваемыми угловыми скоростями вращения ПГ на уровне десятков градусов в секунду и высоким значением возмущающего гироскопического момента, действующего по оси ПГ [4].

Управляющий момент СГК определяется как векторное произведение кинетического момента ротора гиromотора на угловую скорость поворота его подвеса [5, 6]. Стабильность модуля кинетического момента ротора обеспечивается с точностью до десятых долей процента, поэтому точность реализации управляющего момента СГК определяется работой исполнительного электропривода (ИЭП) подвеса гиromотора (ПГ) силового гироскопического прибора (СГП) [7, 8].

Описание проблемы

Современный бортовой ИЭП строится на основе вентильного двигателя и работает в режиме обратной связи по угловому положению ПГ. На валу ПГ располагается датчик угла, сообщаящий информацию о направлении вектора кинетического момента СГК в систему управления ориентацией КА. Обычно этот датчик угла используется для организации обратной связи по угловому положению и для управления вентильным двигателем. Жесткие требования по ограничению габаритно-массовых характеристик бортовых приводов, стойкости к факторам космического пространства, наличию резервирования и длительному сроку активного существования КА существенно влияют на структуру, состав и элементы конструкции ИЭП [9]. В частности, разрешающая способность датчика угла ограничена

указанными требованиями и обычно не превышает 16–18 разрядов.

В режиме стабилизации требования к точности обработки заданной скорости вращения ИЭП СГК оцениваются следующим условием: при задании в моменты времени t_i с интервалом $t_{\delta} = t_{(i+1)} - t_i = 0,125$ с значений скорости в моменты времени $t_i + 2 \cdot t_{\delta}$ должно выполняться неравенство:

$$|\Delta\beta_f - \Delta\beta_p| \leq \delta\beta, \quad (1)$$

где $\Delta\beta_f = \beta(t_i + 2 \cdot t_{\delta}) - \beta(t_i)$, $\beta(t_i + 2 \cdot t_{\delta})$, $\beta(t_i)$ – угловые положения ПГ;

$$\Delta\beta_p = [u(t_i) + u(t_i + t_{\delta})] \cdot t_{\delta}, \quad (2)$$

где $u(t_i)$, $u(t_i + t_{\delta})$ – заданные скорости вращения подвеса.

При этом величина $\delta\beta$ должна быть менее 15" для циклограмм штатных задаваемых угловых скоростей ИЭП СГК, представленных заказчиком. Пример такой циклограммы представлен на рис. 1.

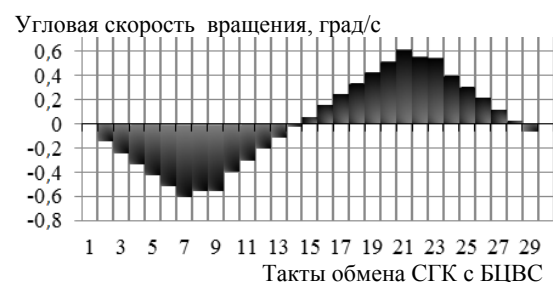


Рис. 1. Типичная циклограмма задаваемых угловых скоростей ИЭП СГК

Структурная схема ИЭП СГК с датчиком угла обратной связи, расположенным на оси ПГ, работающего в режиме следящей системы по линейно изменяющемуся углу, представлена на рис. 2, где И – интегратор скорости; РУ – регулятор контура углового положения; ВШИМ – векторный широтно-импульсный модулятор; БВУ – блок вычисления углового положения ротора двигателя; КУМ – ключевой усилитель мощности; Д – двигатель; Р – редуктор; ПГ – подвес гироскопа; ДУ ПГ – датчик уг-

лового положения ПГ; ЭП ДУ – электронный преобразователь сигнала датчика угла; МК – микроконтроллер; БУП – блок управления приводом; ИЭП – исполнительный электропривод; N_ω – управляющий код скорости; $N_\phi^{\text{зад}}$ – расчётный код углового положения ПГ; ΔN_ϕ – сигнал рассогласования контура углового положения; $N_{\text{ШИМ}}$ – входное значение кода ВШИМ; T_a, T_b, T_c – длительности сигнала

лов ВШИМ, управляющие КУМ; $U_{\text{амп1}}, U_{\text{амп2}}, U_{\text{амп3}}$ – амплитудные значения линейных напряжений, подаваемых на двигатель; $\alpha_{\text{ДВ}}$ – значение углового положения вала двигателя; $\alpha_{\text{ПГ}}$ – значение углового положения ПГ; $M_{\text{упр}}$ – значение момента упругости, создаваемого ПГ; $N_{\text{ПГ}}$ – код измеренного углового положения ПГ.

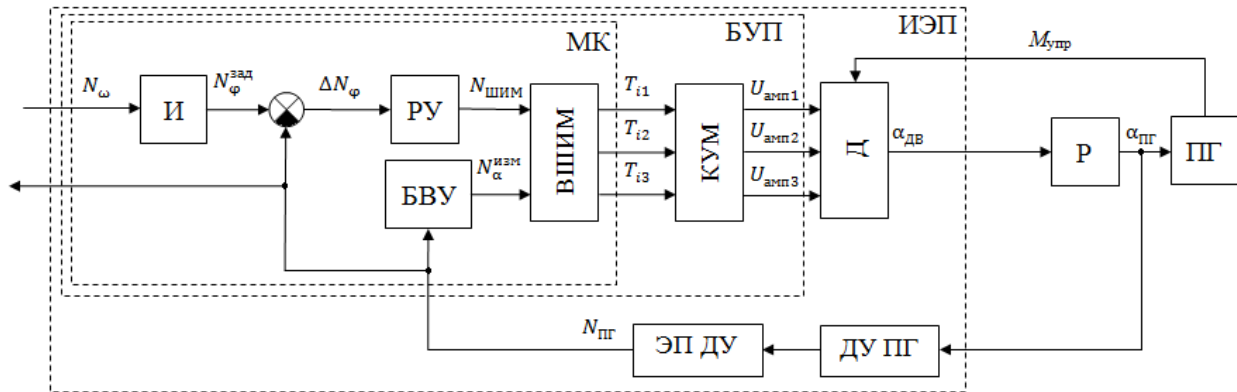


Рис. 2. Структурная схема ИЭП SGK с датчиком обратной связи, расположенным на оси ПГ

Предлагаемое решение

Проработка технических решений показала возможность выполнения заданных требований к точности обработки заданной угловой скорости вращения при использовании рассмотренной схемы построения ИЭП в связи с тем, что требовалось увеличение числа разрядов датчика угла до 21–22.

Так как в состав ИЭП входит редуктор (коэффициент редукции 16), для выполнения заданных технических требований было предложено решение об установке датчика угла на ось двигателя ИЭП для организации контура управления по информации об угловом положении ротора двигателя ИЭП. Это яв-

ляется принципиальным отличием от построения системы управления ИЭП SGK, рассмотренной выше. Использование обратной связи по угловому положению ротора двигателя повышает чувствительность ИЭП и как следствие улучшает его динамические характеристики в режиме малых скоростей, что необходимо для выполнения требования к точности обработки заданной угловой скорости поворота подвеса [10–13]. Структурная схема ИЭП, представленная на рис. 2, может быть преобразована к виду, представленному на рис. 3, где ДУ Д – датчик углового положения ротора двигателя; $N_{\text{Д}}$ – код измеренного углового положения ротора двигателя.

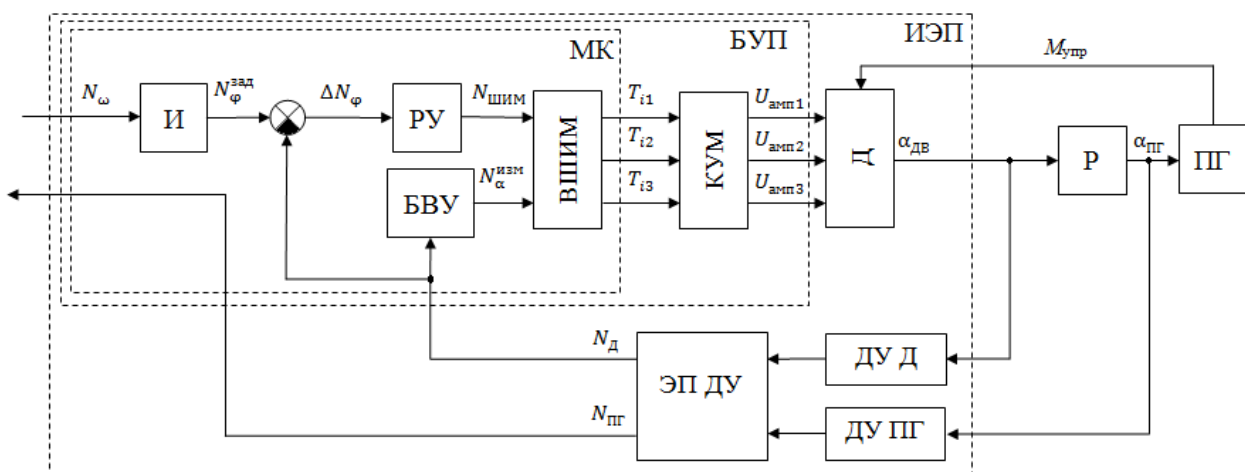


Рис. 3. Структурная схема ИЭП SGK с датчиком обратной связи, расположенным на оси двигателя

Коэффициент интегрирования скорости вычисляется по следующей формуле [14, 15]:

$$K_\omega = \frac{K_{\text{кр}}}{\delta} \cdot i, \quad (3)$$

где $K_{\text{кр}}$ – крутизна характеристики «код–скорость», δ – дискретность преобразования «угол–код» датчика угла; i – передаточное число редуктора (в случае расположения датчика обратной связи на оси ПГ $i = 1$).

Крутизна характеристики «код–скорость» определяется как

$$K_{кр} = \frac{\omega_{зад, макс}}{2^n - 1}, \quad (4)$$

где $\omega_{зад, макс}$ – максимальная задаваемая скорость; n – используемое число разрядов регистра, хранящего значение задаваемой скорости (без учета знакового разряда).

Для отработки системы управления ИЭП с датчиком обратной связи, расположенным на оси ПГ, и датчиком обратной связи, расположенным на оси двигателя, было проведено макетирование с использованием 17-разрядного датчика угла в контурах обратной связи. На рис. 4 представлены диаграммы углового положения ПГ при отработке ИЭП минимальной угловой скорости вращения – 0,0042 °/с при расположении датчика обратной связи на оси ПГ (рис. 4, а) и на оси двигателя (рис. 4, б). Видно, что качество отработки угловой скорости вращения ПГ гораздо выше при расположении датчика обратной связи на оси двигателя.

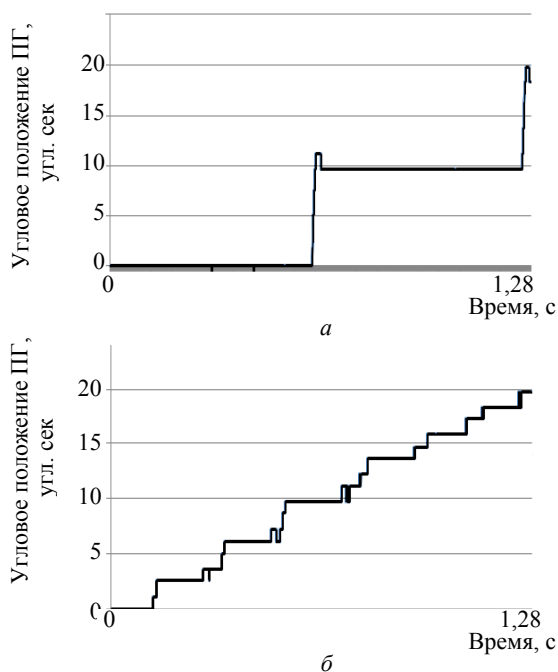


Рис. 4. Диаграммы углового положения ПГ при отработке ИЭП минимальной угловой скорости вращения: а – при расположении датчика обратной связи на оси ПГ; б – при расположении датчика обратной связи на оси двигателя

На рис. 5 представлены диаграммы погрешности $(\Delta\beta_f - \Delta\beta_p)$ отработки ИЭП задаваемой угловой скорости вращения по циклограмме, представленной на рис. 1, при расположении датчика обратной связи на оси ПГ (рис. 5, а) и на оси двигателя (рис. 5, б). Видно, что погрешность отработки задаваемой угловой скорости вращения существенно снижается при расположении датчика обратной связи на оси двигателя.

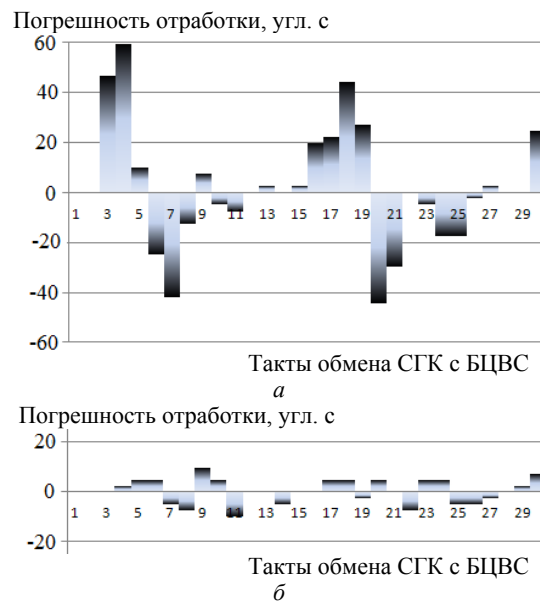


Рис. 5. Диаграммы погрешности отработки ИЭП задаваемой угловой скорости вращения: а – при расположении датчика обратной связи на оси ПГ; б – при расположении датчика обратной связи на оси двигателя

Несмотря на преимущества установки датчика обратной связи на оси двигателя, использование подобной системы управления имеет существенный недостаток: часть элементов конструкции ИЭП (редукторная передача и ПГ) не охвачена контуром управления. Вследствие этого в создаваемую угловую скорость вращения ПГ будет вноситься погрешность, обусловливаемая нежесткостью конструкции СГП, люфтом редукторной передачи и несоосностью осей двигателя и ПГ.

На рис. 6 представлены результаты отработки ИЭП угловой скорости вращения ПГ при расположении датчиков обратной связи на оси ПГ и на оси двигателя. Видно, что при расположении датчика обратной связи на оси двигателя наблюдаются колебания угловой скорости вращения ПС, которые отсутствуют при расположении датчика обратной связи на оси ПГ. Такие колебания могут отрицательно сказываться на работе системы ориентации КА.

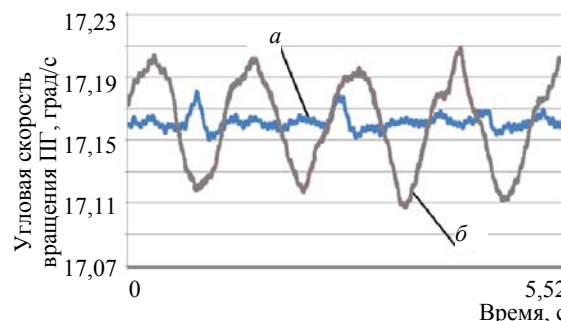


Рис. 6. Пульсации угловой скорости вращения ПГ: а – при расположении датчика обратной связи на оси ПГ; б – при расположении датчика обратной связи на оси двигателя

На основании вышеизложенного, видится построение ИЭП с использованием двух датчиков угла обратной связи. Причем датчик угла, установленный

на оси двигателя, должен будет замыкать обратную связь только в режиме малых скоростей, когда влияние нежесткости конструкции, люфта редуктора и несоосности осей минимально или отсутствует. В режиме средних и высоких скоростей в качестве

датчика обратной связи должен использоваться датчик угла, расположенный на оси ПГ. При этом структурная схема ИЭП, представленная на рис. 3, примет вид, представленный на рис. 7, где И1 и И2 – интеграторы скорости; АС – анализатор скорости.

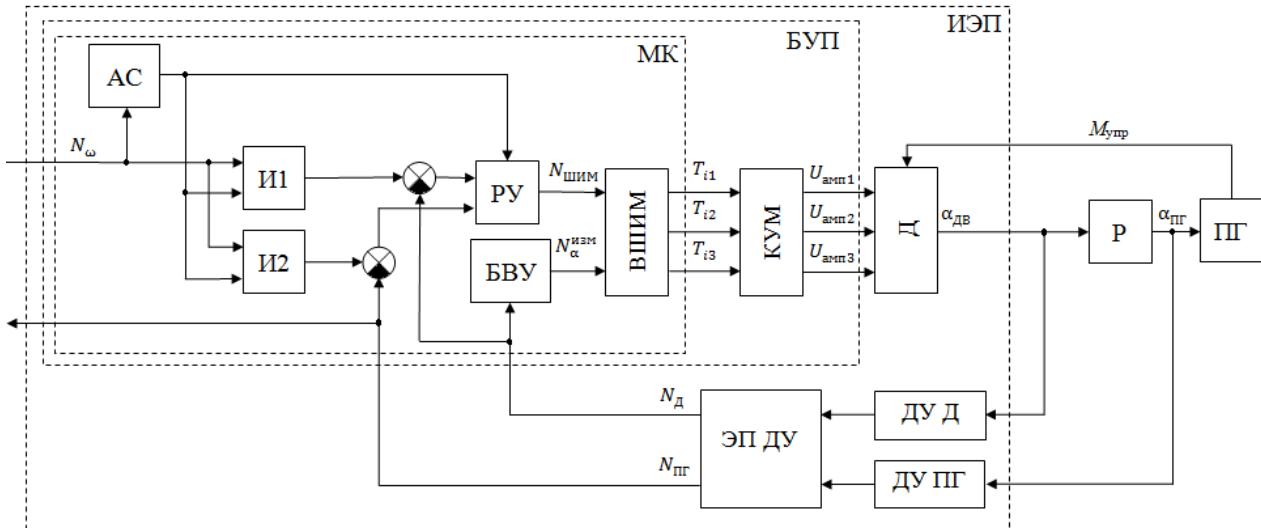


Рис. 7. Структурная схема ИЭП СГК с двумя датчиками обратной связи

Анализатор скорости настроен на определение перехода границы между низкой и высокой скоростью. При этом меняются коэффициенты регулятора и задается новое значение интегратора скорости того контура, на котором в дальнейшем будет работать система. Новое значение интегратора рассчитывается таким образом, чтобы сохранить текущее значение сигнала рассогласования по отношению к оси ПГ. Например, при переходе высокой скорости на низкую новое значение интегратора И1 рассчитывается по формуле

$$N_{i1} = N_D + N_{СР_ПГ} \cdot i, \quad (5)$$

где N_{i1} – значение, записываемое в интегратор скорости контура углового положения двигателя; N_D – текущее угловое положение ротора двигателя; $N_{СР_ПГ}$ – значение сигнала рассогласования в контуре углового положения ПГ; i – передаточное число редуктора.

При переходе с низкой скорости на высокую

$$N_{i2} = N_{ПГ} + \frac{N_{СР_Д}}{i}, \quad (6)$$

где N_{i2} – значение, записываемое в интегратор скорости контура углового положения ПГ; $N_{ПГ}$ – текущее угловое положение ПГ; $N_{СР_Д}$ – значение сигнала рассогласования в контуре углового положения ротора двигателя; i – передаточное число редуктора.

На рис. 8 и 9 представлены переходные процессы угловой скорости вращения ПГ при переходе с обрабатываемой высокой угловой скорости на низкую и низкой угловой скорости на высокую соответственно. На рис. 8, а и 9, а представлены результаты

при работе ИЭП с переключающимися датчиками обратной связи, на рис. 8, б и 9, б представлены результаты работы ИЭП на одном датчике обратной связи, расположенном на оси ПГ. На оси абсцисс отмечены такты съема информации, длительность одного такта составляет 160 мкс.

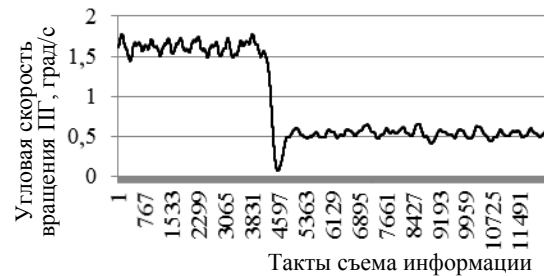


Рис. 8. Переходные процессы угловой скорости вращения ПГ: а – при работе ИЭП от двух датчиков обратной связи; б – при расположении датчика обратной связи только на оси ПГ

Видно, что переходные процессы угловой скорости вращения ПГ практически идентичны, несмотря на отличную структуру ИЭП. Таким образом, описанный пересчет хранящегося в интеграторе

скорости (И1 или И2) значения позволяет осуществить плавный переход работы ИЭП с одного датчика обратной связи на другой, без внесения дополнительных возмущений в переходной процесс угловой скорости вращения ПГ.

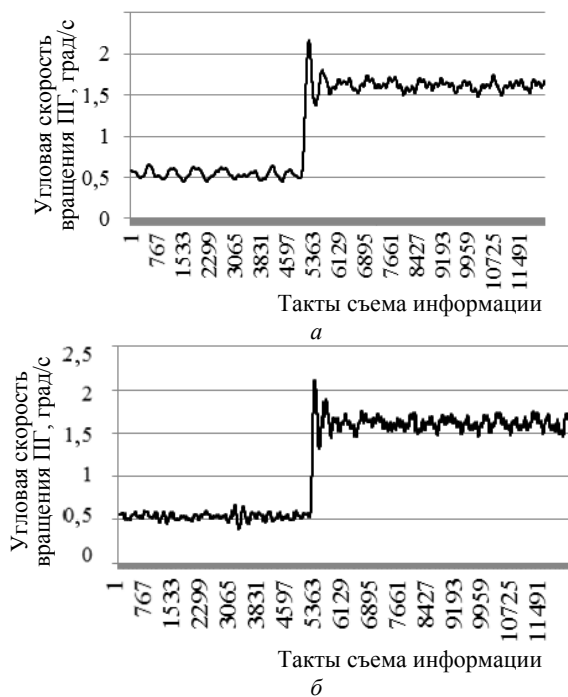


Рис. 9. Переходные процессы угловой скорости вращения ПГ: а – при работе ИЭП от двух датчиков обратной связи; б – при расположении датчика обратной связи только на оси ПГ

Заключение

Подобное построение системы управления угловой скоростью вращения позволяет повысить чувствительность в режиме малых задаваемых скоростей и в то же время обрабатывать погрешности, связанные с несоосностью осей ПГ и двигателя, жесткостью конструкции СГП и люфтом редуктора.

Литература

- Бровкин А.Г. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учеб. пособие / А.Г. Бровкин, Б.Г. Бурдыгов, С.В. Гордийко. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с.
- Распопов В.Я. Силовые гироскопические комплексы в системах стабилизации и управления космических аппаратов. Образовательный аспект // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – № 3(305). – С. 127–131.
- Разработка систем ориентации и стабилизации микроспутников / Н.А. Ивлев, С.О. Карпенко, А.С. Сивков и др. // *Механика, управление и информатика*. – 2014. – Т. 6, № 1(46). – С. 43–60.
- Современное состояние и перспективы развития силовых гироскопических комплексов / А.Р. Мкртычян, Н.И. Башкеев, Д.О. Якимовский, Д.И. Акашев, О.Б. Яковец // *Гироскопия и навигация*. – 2015. – № 1(88). – С. 93–99.
- Сорокин А.В. Электромеханические исполнительные органы для систем ориентации малых космических аппаратов // *Гироскопия и навигация*. – 1998. – № 4. – С. 81–88.

- Heiberg Ch.J. Precision spacecraft pointing using single-gimbal control moment gyroscopes with disturbance / Ch.J. Heiberg, D. Bailey, B. Wie // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2000. – Vol. 23, No. 1. – P. 77–85.

- Арефьев В.П. Инерционные исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов / В.П. Арефьев, А.В. Сорокин, Н.И. Башкеев, О.А. Кондратьев // *Гироскопия и навигация*. – 1995. – № 2(9). – С. 7–11.

- Яковец О.Б. Математическое моделирование процессов управления силовыми гироскопическими приборами // *Завалишинские чтения* 9: сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2009. – С. 196–201.

- Джукич Д.И. Низкоскоростной исполнительный электропривод устройства поворотного солнечной батареи / Д.И. Джукич, Д.О. Якимовский, Д.С. Положенцев // *Завалишинские чтения* 17: сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2017. – С. 88–94.

- Трахтенберг Р.М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. – М.: Энергоиздат, 1982. – 168 с.

- Положенцев Д.С. Организация систем управления угловой скоростью с помощью индукционных датчиков угла / Д.С. Положенцев, Д.И. Джукич // *Молодежь. Техника. Космос: тр. VI Общерос. молодежной науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т*. – СПб., 2014. – С. 185–186.

- Джукич Д.И. Организация систем управления низкоскоростных электроприводов / Д.И. Джукич, Д.О. Якимовский, Д.С. Положенцев // *Завалишинские чтения* 14: сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2014. – С. 139–141.

- Филипс Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.

- Бураков М.В. Нечеткое управление силовым гироскопическим прибором / М.В. Бураков, О.Б. Яковец // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 2015. – Т. 58, № 10. – С. 804–809.

- Положенцев Д.С. Исполнительный электропривод гиродина / Д.С. Положенцев, Д.И. Джукич // *Электронные и электромеханические системы и устройства: сборник научных трудов*. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2016. – С. 301–306.

Дмитрий Олегович Якимовский

Канд. техн. наук, начальник науч.-исслед. отд. АО «НИИ командных приборов»
Трамвайный пр-т, д. 16, г. Санкт-Петербург, Россия, 198216
Тел.: +7-921-319-30-24
Эл. почта: yakimovsky@yandex.ru

Дмитрий Сергеевич Положенцев

Аспирант каф. прикладной механики, автоматизации и управления, инж. I кат. АО «НИИ командных приборов»
Трамвайный пр-т, д. 16, г. Санкт-Петербург, Россия, 198216
Тел.: +7-904-647-65-64
Эл. почта: pds6476564@yandex.ru

Даниэл Йорданович Джукич

Аспирант каф. прикладной механики, автоматизации и управления, инж. I кат. АО «НИИ командных приборов»
Трамвайный пр-т, д. 16, г. Санкт-Петербург, Россия, 198216
Тел.: +7-921-983-03-87
Эл. почта: ddi791@mail.ru

Yakimovskiy D.O., Polozhentsev D.S., Djukich D.Y.
Increasing sensitivity of control moment gyroscope electric drive when operating at low rotational velocities

The article deals with the issues of designing a control moment gyroscope electric drive characterized by strict requirements to the accuracy of operation at low rotational velocities. The article shows a block diagram for the electric drive with increased sensitivity to operation at low rotational velocities. The results of the electric drive experimentally are also presented.

Keywords: angular velocity control system, angle feedback, electric drive.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-103-108

References

1. Brovkin A.G., Burdygov B.G., Gordiyko S.V. *Bortovye sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami: uchebnoe posobie* [Onboard Spacecraft Control Systems: Tutorial]. Moscow, MAI-PRINT, 2010, 304 p.
2. Raspopov V.Y. Force gyroscopic complexes in spacecraft stabilization and control systems. Educational aspect. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2014, № 3 (305), pp. 127–131.
3. Ivlev N.A., Karpenko S.O., Sivkov A.S. et al. Development of systems for orientation and stabilization of microsatellites. *Mechanics, Control, and Informatics*, 2014, vol. 6, no. 1 (46), pp. 43–60.
4. Mkrtychyan A.R., Bashkeev N.I., Yakimovskiy D.O. et al. The current state and prospects of development of power gyroscopic complexes. *Gyroscopy and navigation*, 2015, no. 1 (88), pp. 93–99.
5. Sorokin A.V. Electromechanical executive bodies for small spacecraft orientation systems. *Gyroscopy and navigation*, 1998, no. 4, pp. 81–88.
6. Ch.J. Heiberg, D. Bailey, B. Wie. Precision spacecraft pointing using single-gimbal control moment gyroscopes with disturbance. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2000, vol. 23, no. 1, pp. 77–85.
7. Arefev V.P., Sorokin A.V., Bashkeev N.I., Kondrat'ev O.A. Inertial actuators of the spacecraft orientation systems. *Gyroscopy and navigation*, 1995, no. 2 (9), pp. 7–11.
8. Yakovets O.B. Mathematical modeling of control processes for power gyroscopic devices. *Proc. report scientific and technical conf. Zavalishin's Rreading*. SPb., 2009, pp. 196–201.
9. Dzhukich D.J., Yakimovskiy D.O., Polozhentsev D.S., Low-speed executive electric device of the rotary solar battery. *Zavalishin's Rreadings*, Sat. reports. SPB, GUAP, 2017, pp. 88–94.
10. Trakhtenberg R.M. *Impulsnye astaticheskie sistemy elektroprivoda s diskretnym upravleniem* [Pulsed astatic systems of the electric drive with discrete control]. Moscow, Energoizdat, 1982, 168 p.
11. Polozhentsev D.S., Dzhukich D.J. Organization of angular velocity control systems using induction angle sensors. *Youth. Equipment. Cosmos: works of the VI All-Russian Youth Scientific-Techn. conf. Balt state tech. the university*. SPb, 2014, pp. 185–186.
12. Dzhukich D.J., Yakimovskiy D.O., Polozhentsev D.S. Organization of control systems for low-speed electric drives. *Zavalishin's Reading*, Sat. report. SPB, GUAP, 2014, pp. 139–141.
13. Phillips Ch., Harbor R. *Sistemy upravleniya s obratnoy svyaz'u* [Systems of feedback control]. Moscow, Laboratory of Basic Knowledge, 2001, 616 p.
14. Burakov M.V., Yakovets O.B. Fuzzy control of a power gyroscopic device. *Izvestiya Vuzov. Instrument Engineering*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 804–809.
15. Polozhentsev D.S., Dzhukich D.J. Executive electric drive gyrodine, *Electronic and electromechanical systems and devices: collection of scientific papers*, Tomsk, Tomsk Polytechnic University Press, 2016, pp. 301–306.

Dmitriy O. Yakimovskiy

Candidate of Technical Sciences, Head Research Department JSC «Command Devices Research Institute»
 16, Tramvaynyy pr., St. Petersburg, Russia, 198216
 Phone: +7-921-319-30-24
 Email: yakimovskiy@yandex.ru

Dmitriy S. Polozhentsev

PhD Student of the Department of Applied Mechanics, Automation and Control, Engineer of the 1st category JSC «Command Devices Research Institute»
 16, Tramvaynyy pr., St. Petersburg, Russia, 198216
 Phone: +7-904-647-65-64
 Email: pds6476564@yandex.ru

Daniel Y. Dzhukich

PhD Student of the Department of Applied Mechanics, Automation and Control, Engineer of the 1st category JSC «Command Devices Research Institute»
 16, Tramvaynyy pr., St. Petersburg, Russia, 198216
 Phone: +7-921-983-03-87
 Email: ddi791@mail.ru

УДК 621.316.71

М.В. Поляков, А.С. Дмитриенко, О.Ю. Завьялова,
В.П. Лянзбург, Г.Н. Гладышев, Н.Н. Балковой

Современное состояние и перспективы развития управляющих двигателей-маховиков

Рассматриваются современный технический уровень и перспективные направления развития управляющих двигателей-маховиков систем ориентации и стабилизации космических аппаратов. Особое внимание уделено научно-техническим задачам, связанным с внедрением непосредственного управления по динамическому моменту, снижением возмущающих моментов и массогабаритных характеристик. Отмечены особенности, возникающие при использовании двигателей-маховиков на малых и тяжелых космических аппаратах. Приведены преимущества интеллектуализации управляющих двигателей-маховиков.

Ключевые слова: управляющий двигатель-маховик, космический аппарат, технический уровень, перспективы.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-109-114

В настоящее время в качестве электромеханических исполнительных органов систем ориентации и стабилизации различных отечественных и зарубежных космических аппаратов (КА) применяются, главным образом, управляющие двигатели-маховики (УДМ), реже – силовые гироскопы. Основными задачами УДМ являются осуществление высокоточной угловой стабилизации и управление ориентацией КА в пространстве средствами формирования динамических и кинетических моментов по осям стабилизации.

Формирование динамического момента УДМ M_d , приложенного к корпусу КА, осуществляется путем изменения кинетического момента УДМ H за счет изменения угловой скорости вращения ротора ω :

$$M_d = M_{эм} - M_c \text{sign}(\omega) = \frac{dH}{dt} = J_o \frac{d\omega}{dt} = J_o \varepsilon, \quad (1)$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент сил, создаваемый электродвигателем УДМ; M_c – результирующий момент сопротивления вращению ротора УДМ; J_o – осевой момент инерции ротора УДМ; ε – угловое ускорение ротора УДМ.

Конструктивно УДМ состоит из двухфазного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), ротора, выполненного в виде маховика, шарикоподшипниковых опор, корпуса, основания и блока электроники, содержащего регулятор тока, вторичный источник питания, сигнальный и силовой интерфейсы.

УДМ оснащен двухфазным датчиком положения ротора, выдающим на выходе гармонические напряжения, которые подаются на входы регуляторов тока и обеспечивают гармоническую форму тока в обмотках двигателя и отсутствие пульсаций электромагнитного момента.

В зависимости от расположения опор относительно диска ротора выделяют консольную [1] и симметричную [2] конструктивные схемы. Консольная конструкция УДМ имеет лучшие массогабаритные характеристики по сравнению с симметричной, однако в тех случаях, когда требуется повышенная прочность конструкции, например для тяжелых КА,

предпочтительно симметричное размещение опор относительно ротора.

Большинство конструкций УДМ оснащено гермокамерой, которая служит не только для уменьшения аэродинамической составляющей момента сопротивления вращению ротора, но и обеспечивает комфортные условия работы шарикоподшипниковых опор, что повышает их надежность и увеличивает срок службы.

Анализ характеристик современных УДМ отечественного и зарубежного производства, а также требований, предъявляемых к ним заказчиками, позволяет выделить следующие основные направления развития УДМ:

- снижение массогабаритных характеристик;
- увеличение срока активного существования;
- расширение области применения как вследствие усиленного развития класса малоразмерных КА, так и за счет более широкого использования на аппаратах тяжелого класса;
- повышение точности выходных характеристик;
- снижение возмущающих моментов;
- интеллектуализация функций.

Снижение массогабаритных характеристик и увеличение срока активного существования УДМ

Данные требования являются общими для всей бортовой аппаратуры КА и достигаются применением более легких материалов и современных электрорадиоизделий с длительным сроком хранения. Кроме того, снижение массы достигается переходом на моноблочную конструкцию, в которой платы электроники размещены на основании УДМ [3]. Моноблочная конструкция обеспечивает меньший объем, занимаемый УДМ на КА, и дает возможность размещать его в различных местах контейнера без наличия силовых кабелей. Кроме того, размещение плат электроники в силовом корпусе УДМ обеспечивает дополнительную защиту от излучений.

Расширение области применения

Применение УДМ на тяжелых КА требует увеличения кинетических H и управляющих M_d моментов. Согласно (1) увеличение кинетического момента УДМ H достигается повышением угловой скоро-

сти вращения ротора ω либо осевого момента инерции ротора J_0 . При повышении угловой скорости снижается ресурс шарикоподшипников, возрастают потребляемая мощность, момент сопротивления вращению, возмущающие моменты УДМ. Увеличение осевого момента инерции J_0 ротора увеличивает массу УДМ, момент сопротивления вращению и момент трогания. Поэтому задача в данном случае сводится к поиску компромисса между перечисленными параметрами и решается исходя из требуемых характеристик и назначения КА.

Применение УДМ на тяжелых аппаратах обуславливает необходимость увеличения управляющего динамического момента, что, в свою очередь, ведет к возрастанию рабочего тока УДМ. Возможным вариантом снижения рабочего тока является переход с шины питания прибора «27 В» на шину «100 В». В этом случае тепловые потери уменьшаются пропорционально квадрату тока потребления. Переход на шину «100 В» влечет за собой применение в схемах мостовых инверторов питания фаз УДМ транзисторов MOSFET и IGBT взамен биполярных.

При использовании УДМ на малых КА необходимо обеспечить минимальные массогабаритные характеристики УДМ и управляющей электроники, минимальное энергопотребление, линейность управляющего воздействия во всем диапазоне изменения кинетического момента. Одновременно с этим конструкция УДМ должна обладать высокой стойкостью к внешним механическим нагрузкам. Решение данных технических проблем – в применении электрорадиоизделий с высокой степенью интеграции в совокупности с отказом от полного резервирования электроники в связи с малым сроком активного существования (обычно менее 5 лет), в оптимизации УДМ по критерию «энергопотребление – масса ротора» и использовании высокопрочных конструкционных сплавов [4].

Повышение точности выходных характеристик УДМ

Повышение их точности требует внедрения новых законов управления. Основными обобщенными характеристиками УДМ являются развиваемые моменты – кинетический H и динамический M_d , определяемые динамикой КА.

Из (1) видно, что возможны два способа управления моментом M_d : косвенный и непосредственный.

В первом случае реализуется частотно-токовый способ управления СДПМ в соответствии с функциональной схемой (рис. 1), состоящей из электродвигателя ЭД, датчиков положения ротора ДПР и тока ДТ, маховика М и регулятора тока РТ.

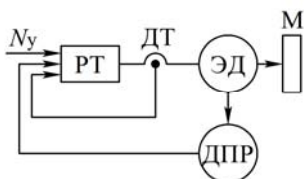


Рис. 1. Функциональная схема частотно-токового регулятора момента УДМ

В схеме реализуется линейная зависимость амплитуды фазного тока ЭД I_ϕ от значения сигнала управления N_y , поступающего на вход РТ:

$$I_\phi = K_T N_y, \quad (2)$$

где K_T – коэффициент преобразования кода управления в фазный ток.

Электромагнитный момент электродвигателя УДМ линейно зависит от амплитуды фазного тока и при гармонической форме потока возбуждения и амплитуды огибающих выходных напряжений ДПР не имеет пульсаций:

$$M_{эм} = C_M I_\phi, \quad (3)$$

где C_M – коэффициент пропорциональности.

Подставляя (2), (3) в (1), получаем закон формирования динамического момента УДМ при частотно-токовым способе управления:

$$M_d = C_M K_T N_y - M_c \text{sign}(\omega), \quad (4)$$

Произведение $C_M K_T N_y$ представляет собой функцию управления, на нее накладывается помеховая составляющая от момента сопротивления M_c , значение которой зависит от угловой скорости вращения ротора ω (рис. 2). В частности, при $\omega = 0$ формируется зона нечувствительности по управлению из-за влияния момента трогания M_t :

$$N_{ун} = \frac{M_t}{C_M K_T}. \quad (5)$$

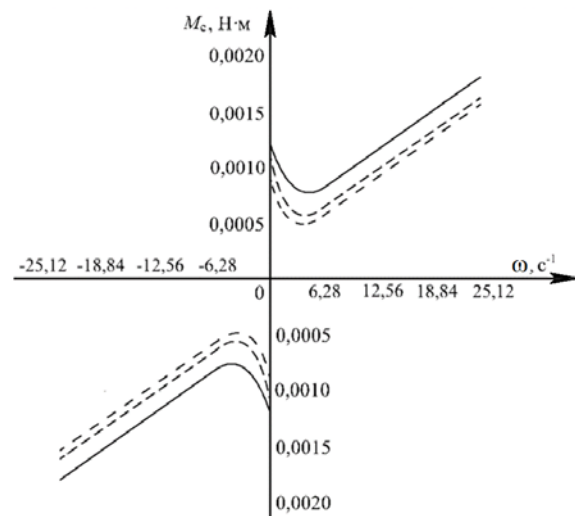


Рис. 2. Графики зависимости момента сопротивления от угловой скорости вращения ротора УДМ

Из рис. 1 видно, что рассмотренный способ управления имеет простую техническую реализацию, поэтому в настоящее время широко используется в различных УДМ.

Для повышения точности выходных характеристик УДМ необходимо исключить влияние моментов сопротивления и трогания на функцию управления, этого можно добиться либо их компенсацией, либо внедрением непосредственного управления по динамическому моменту.

Компенсация моментов сопротивления и трогания заключается в суммировании функции управле-

ния с дополнительным сигналом, равным моменту сопротивления [5]. Однако в связи с нестабильностью и нелинейностью момента сопротивления [6] полностью компенсировать его не удается.

Непосредственное управление [7–9] обеспечивает управление динамическим моментом путем регулирования углового ускорения вращения ротора в соответствии с выражением

$$M_d = J_o \varepsilon. \tag{6}$$

Функциональная схема, реализующая данный способ управления (рис. 3), содержит дополнительный модуль регулятора динамического момента РДМ, выполненный, например, на основе цифрового интегратора сигнала управления. Регулятор динамического момента обеспечивает пропорциональное равенство

$$\varepsilon = K_\varepsilon N_y, \tag{7}$$

из которого следует пропорциональный закон управления, не зависящий от момента сопротивления вращению:

$$M_d = KN_y. \tag{8}$$

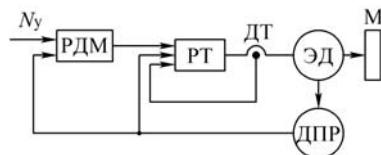


Рис. 3. Функциональная схема непосредственного регулятора момента УДМ

Результаты внедрения модуля регулятора динамического момента, полностью построенного на отечественной элементной базе в УДМ с кинетическим моментом 2 Н·м·с и динамическим моментом 0,05 Н·м, показали, что регулировочная характеристика имеет линейный характер, а разрешающая способность прибора составляет 0,000025 Н·м/ед. Расчетная погрешность крутизны регулировочной характеристики по результатам испытаний составила не более 0,05%. Масса модуля РДМ не превышает 120 г, а потребляемая мощность – 0,4 Вт. При этом существенно расширился функционал прибора – возможны три режима управления: по электромагнитному, кинетическому и динамическому моментам [10].

Снижение возмущающих моментов УДМ

Наряду с динамическим моментом УДМ создает и знакопеременные возмущающие моменты [11–13], которые возбуждаются поступательными и угловыми колебаниями главной центральной оси инерции неуравновешенного ротора и подшипниковых опор, содержащих собственные подвижные части: наружное кольцо, шарики, сепаратор [14, 15].

Подшипники качения являются источником вибраций широкого спектра, вызванных отклонениями их геометрических форм и размеров в пределах допусков. Наиболее существенные из них – зазоры, радиальный и осевой бой колец, овальность, гранность и конусность колец, разноразмерность, овальность и гранность шариков, допуски в гнездах сепараторов, волнистость и шероховатость дорожек

качения. Основные причины подшипниковых вибраций и соответствующие им частоты приведены в таблице.

Частоты вибраций шарикоподшипника

Причина	Частота, Гц
Овальность колец подшипника	$\frac{2n}{60}$
Разноразмерность шариков	$\frac{r_1 - z n}{r_1 + r_2} \frac{n}{2 \cdot 60}$
Зазоры в гнездах сепаратора, неуравновешенность сепаратора	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_{ш}}{D_0}\right) \frac{n}{60}$
Периодическое изменение жесткости подшипника при перекатывании тел качения	$\frac{z}{2} \left(1 - \frac{d_{ш}}{D_0}\right) \frac{n}{60}$
Овальность и гранность тел качения	$\frac{D_0}{d_{ш}} \left(1 - \frac{d_{ш}^2}{D_0^2}\right) \frac{z kn}{2 \cdot 60}$
Волнистость колец подшипника	$\frac{m}{2} \left(1 \pm \frac{d_{ш}}{D_0}\right) \frac{n}{60}$
<i>n</i> – частота вращения ротора, об/мин; <i>r</i> ₁ , <i>r</i> ₂ – радиусы дорожек качения внутреннего и наружного колец; <i>z</i> – число тел качения; <i>D</i> ₀ – диаметр центров тел качения; <i>d</i> _ш – диаметр тел качения; <i>k</i> – число граней; <i>m</i> – число волнистостей по окружности дорожки качения внутреннего или наружного кольца	

Снижение возмущающих воздействий УДМ, обусловленных вибрациями подшипникового узла, достигается за счет применения прецизионных радиально-упорных подшипников (классов точности 2 и 4) с дополнительными требованиями по уровню вибраций. Кроме того, упругое поджатие колец шарикоподшипника позволяет повысить жесткость подшипникового узла, увеличить собственные частоты роторной системы и тем самым снизить возмущающие моменты.

Помимо обеспечения достаточной жесткости подшипникового узла, необходимо, чтобы собственные конструктивные частоты ротора не лежали в рабочем диапазоне частоты вращения ротора УДМ (0...*n*). Требование к собственным частотам ротора *f*_p можно записать следующим образом:

$$f_p = (1,3 \dots 1,5) \frac{\pi n}{30}. \tag{9}$$

Одновременно с этим требованием ротор должен иметь минимально возможные массогабаритные характеристики и достаточные коэффициенты запаса по прочности и текучести, исключающие возможность его разбалансировки и разрыва в процессе вращения.

Для оптимизации конструкции ротора, наиболее полно удовлетворяющей вышеперечисленным требованиям, проводится конечно-элементное моделирование динамики роторной системы, в результате которого определяются ее собственные частоты (рис. 4), в том числе и в виде диаграмм Кэмпбелла, перемещения, деформации и напряжения в конструкции ротора.

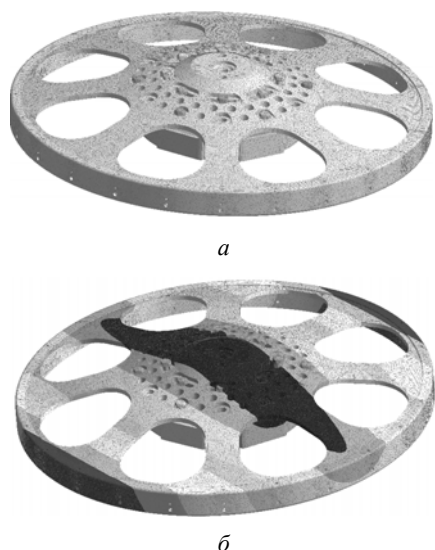


Рис. 4. Конечно-элементное моделирование динамики ротора: *а* – конечно-элементная модель; *б* – результаты моделирования в виде моды колебаний, соответствующей первой собственной частоте

Амплитуда возмущающих моментов в основном определяется остаточным дисбалансом ротора. Поэтому снижение возмущающих моментов напрямую зависит от качества проведения балансировки ротора УДМ.

Для повышения точности, помимо применения прецизионного балансировочного оборудования, балансировку ротора осуществляют в собственных шарикоподшипниках в составе УДМ, что позволяет в определенной степени компенсировать подшипниковые вибрации. Кроме того, ряд конструктивных мер, в том числе и изготовление деталей, входящих в роторную систему, из материалов с одинаковыми коэффициентами теплового расширения, обеспечивает стабильность балансировки в течение всего срока службы УДМ.

Интеллектуализация функций УДМ

В настоящее время благодаря появлению радиационно стойких отечественных электрорадиоизделий, в частности ПЛИС и микропроцессоров, возможно создание интеллектуальных УДМ.

Интеллектуализация предполагает качественно новые функциональные возможности УДМ, основные из которых следующие:

- автоматический мониторинг работы узлов, оптимизация структуры и программного обеспечения в различных условиях применения УДМ и полномасштабный объем телеметрической информации;
- защита от пониженного напряжения, включая защиту от плавного снижения напряжения питания;
- защита чувствительных микросхем от тиристорного эффекта;
- ограничение пускового тока;
- целевое управление динамическим, электромагнитным, кинетическим моментами с погрешностью 0,1% и длительностью переходного процесса не более 0,5 мс;

- парирование ошибок в кодах управления и обмена информацией;
- контроль и ограничение кинетического момента в предельных режимах работы УДМ;
- контроль и адаптация температурных режимов работы составных частей УДМ;
- защита источника электропитания от воздействия энергии рекуперации в тормозных режимах УДМ, которая включается при увеличении напряжения на входе прибора и ограничивает создание динамического момента до тех пор, пока двигатель не выйдет из генераторного режима или в сети не появится достаточная нагрузка.

Благодаря данным особенностям интеллектуальные УДМ обладают рядом существенных технических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с традиционными: они адаптивны, имеют широкие возможности гибкой настройки, управления и контроля параметров функционирования.

Заключение

Таким образом, на сегодняшний день основными перспективными направлениями развития УДМ являются внедрение прямого управления по динамическому моменту, интеллектуализация, снижение возмущающих моментов. Данные направления успешно реализуются в АО «НПЦ «Полус» при создании современных УДМ.

Литература

1. Пат. 124079 РФ, МПК Н 02 К 7/02. Электродвигатель-маховик / Ю.Г. Гладышев, Г.Н. Гладышев, В.П. Лянзбург (все РФ). – № 2012114338 / 07; заявл. 11.04.12; опубл. 10.01.13. – Бюл. № 1.
2. Пат. 142222 РФ, МПК Н 02 К 7/02. Электродвигатель-маховик / Ю.Г. Гладышев, Г.Н. Гладышев, В.П. Лянзбург (все РФ). – № 2014103076 / 07; заявл. 29.01.14; опубл. 20.06.14. – Бюл. № 17.
3. Пат. 137710 РФ, МПК Н 02 К 5/02, Н 02 К 7/02. Электродвигатель-маховик / Ю.Г. Гладышев, Г.Н. Гладышев, В.П. Лянзбург (все РФ). – № 2013135406 / 07; заявл. 26.07.13; опубл. 27.02.14. – Бюл. № 6.
4. Ивановченко А.А. Проблемы миниатюризации двигателей-маховиков для космических аппаратов класса микро / А.А. Ивановченко, Ю.Г. Гладышев, П.А. Александров // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12–13 апр. 2018 г.) / АО «НПЦ «Полус». – Томск, 2018. – С. 176–179.
5. Дмитриенко А.С. Способ компенсации момента сопротивления двигателей маховиков / А.С. Дмитриенко, О.Ю. Завьялова, А.А. Сосин // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: матер. III науч.-техн. конф. молодых специалистов ОАО «ИСС». – Железногорск, 2014. – С. 72–73.
6. Михайлов Е.М. Момент трения в шарикоподшипниках изделий для космических аппаратов // Вопросы электромеханики. – 2014. – Т. 140. – С. 3–6.
7. Пат. 1840286 РФ, МПК Н 02 Р 7/28. Устройство управления двигателем-маховиком / В.П. Лянзбург, А.К. Зенков (РФ). – № 2215375 / 09; заявл. 07.01.77; опубл. 27.08.06. – Бюл. № 24.
8. Пат. 2609673 РФ, Н 02 Р 6/08, Н 02 Р 6/12, Н 02 Р 6/18. Способ регулирования частоты вращения электродвигателя / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург.

бург (все РФ). – № 2015112503; заявл. 06.04.15; опубл. 02.02.17. – Бюл. № 4.

9. Пат. 2521617 РФ, МПК Н 02 Р 7/28. Способ управления динамическим моментом двигателя-маховика / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин. – № 2012133007/07; заявл. 01.08.2012; опубл. 10.07.2014. – Бюл. № 4.

10. Балковой Н.Н. Модуль прецизионного цифрового регулятора динамического момента двигателя-маховика // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12–13 апр. 2018 г.) / АО «НПЦ «Полус». – Томск, 2018. – С. 161–164.

11. Vitelli M. A process to verify the microvibration and pointing stability requirements for the BepiColombo mission / M. Vitelli, B. Specht, F. Boquet // International Workshop on Instrumentation for planetary missions. – 2012. – P. 1–5.

12. Smet G. Managing reaction wheel microvibration on a high resolution EO small spacecraft / G. Smet, G. Richardson, S. McLaren, A. Haslehurst // 15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium. – 2013. – P. 1–8.

13. Le M.P. Microdisturbances in reaction wheels // PhD dissertation. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2017. – 166 p.

14. Никифоров А.Н. Проблемы колебаний и динамической устойчивости быстровращающихся роторов // Вестник науч.-техн. развития. – 2010. – № 3 (31). – С. 31–53.

15. Леонтьев М.К. Динамика ротора в подшипниках качения / М.К. Леонтьев, В.А. Карасев, О.Ю. Потапова, С.А. Дегтярев // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2006. – № 4 (7). – С. 40–45.

Поляков Мирослав Вадимович

Инженер-конструктор акционерного общества «Научно-производственный центр «Полус», аспирант Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности (ИШ НКИБ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7 (382-2) 60-66-52 Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Дмитриенко Антон Сергеевич

Вед. инж. акционерного общества «Научно-производственный центр «Полус» Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7 (382-2) 60-66-52 Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Завьялова Ольга Юрьевна

Канд. техн. наук, нач. лаб. акционерного общества «Научно-производственный центр «Полус» Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7 (382-2) 60-66-52 Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Лянзбург Владимир Петрович

Канд. техн. наук, зам. гл. конструктора, нач. отд. акционерного общества «Научно-производственный центр «Полус» Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7 (382-2) 60-66-52 Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Гладышев Герман Николаевич

Канд. техн. наук, нач. лаб. (до 2017 г.) акционерного общества «Научно-производственный центр «Полус» Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7 (382-2) 60-66-52 Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Балковой Николай Николаевич

Вед. инж. акционерного общества «Научно-производственный центр «Полус» Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7 (382-2) 60-66-52 Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Polyakov M.V., Dmitrienko A.S., Zav'yalova O.Yu., Lyanzburg V.P., Gladyshev G.N., Balkovoy N.N.

Reaction wheels: the state-of-the-art and perspectives

The paper presents the state-of-the-art and the prospective lines of development of reaction wheels used in the attitude and orbit control system of spacecraft. Authors give a detailed description of scientific and engineering problems, arising from adoption of dynamic torque control, weight and disturbances reduction. The peculiarities, coupled with application of reaction wheel in small and heavy satellites, are noted. The advantages of smart reaction wheels are described.

Keywords: reaction wheel, spacecraft, state-of-the-art, prospective.

doi: 110.21293/1818-0442-2018-21-3-109-114

References

- Gladyshev Yu.G., Gladyshev G.N., Lyanzburg V.P. *Elektrovdigatel'-makhovik* [Reaction wheel]. Patent RF, no. 124 079, 2013.
- Gladyshev Yu.G., Gladyshev G.N., Lyanzburg V.P. *Elektrovdigatel'-makhovik* [Reaction wheel]. Patent RF, no. 142 222, 2014.
- Gladyshev Yu.G., Gladyshev G.N., Lyanzburg V.P. *Elektrovdigatel'-makhovik* [Reaction wheel]. Patent RF, no. 137 710, 2014.
- Ivanyushchenko A.A., Gladyshev Yu.G., Aleksanov P.A. Problemy miniaturizatsii dvigateley-makhovkov dlya kosmicheskikh apparatov klassa mikro [Issues of reaction wheel miniaturization for microsatellites]. *Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva: tez. dokl. nauch. tekhn. konf. molodykh spetsialistov [Electronic and electro-mechanical systems and apparatuses]*. Proc. of the sci.-techn. conf.]. Tomsk, 2018, pp. 176–179.
- Dmitrienko A.S., Zav'yalova O.Yu., Sosin A.A. Sposob kompensatsii momenta soprotivleniya dvigateley-makhovikov [Method of friction torque compensation in reaction wheels]. *Razrabotka, proizvodstvo, ispytaniya i ekspluatatsiya kosmicheskikh apparatov i system [Development, production, testing and operation of spacecraft and systems]*. Proc. of the III sci.-techn. conf.]. Zheleznogorsk, 2014, pp. 72–73.
- Mikhailov E.M. [Friction torque of aerospace ball bearing]. *Voprosy elektromekhaniki*, 2014, vol. 140, pp. 3–6 (in Russ.).
- Lyanzburg V.P., Zenkov A.K. *Ustroystvo upravleniya dvigatelem-makhovikom*. [Control unit of reaction wheel]. Patent RF, no. 1 840 286, 2006.
- Balkovoy N.N., Muravyatkin Yu.E., Lyanzburg V.P. *Sposob regulirovaniya chastoty vrashcheniya elektrovdigatelya* [Method of motor speed adjustment]. Patent RF, no. 2 609 673, 2017.

9. Balkovoy N.N., Muravyatkin Yu.E. *Sposob upravleniya dinamicheskim momentom dvigatelya-makhovika* [Method of reaction wheel dynamic torque control]. Patent RF, no. 2 012 133 007, 2014.

10. Balkovoy N.N. Modul' pretsizionnogo tsifrovogo regulatora dinamicheskogo momenta dvigatelya-makhovika [Precision digital controller of reaction wheel dynamic torque]. Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva: tez. dokl. nauch. tekhn. konf. molodykh spetsialistov [Electronic and electromechanical systems and apparatuses. Proc. of the sci.-techn. conf.]. Tomsk, 2018, pp. 161–164.

11. Vitelli M., Specht B., Boquet F. A process to verify the microvibration and pointing stability requirements for the BepiColombo mission, *International Workshop on Instrumentation for planetary missions*, 2012, pp. 1–5.

12. Smet G., Richardson G., McLaren S., Haslehurst A. Managing reaction wheel microvibration on a high resolution EO small spacecraft. *15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium*, 2013, pp. 1–8.

13. Le. M.P. Micro-disturbances in reaction wheels // *PhD dissertation. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven*, 2017, 166 p.

14. Nikiforov A.N. [Oscillations, dynamic stability and vibration damping problems of high-speed rotors]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2010, no. 3 (31), pp. 31–53 (In Russ.).

15. Leont'ev M.K., Karasev V.A., Potapova O. Yu., Degtyarev S.A. [Dynamics of rotor with rolling bearing]. *Vibraciya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita*, 2006, no. 4 (7), pp. 40–45.

Miroslav V. Polyakov

PhD student, School of Non-destructive testing & Security, National Research Tomsk Polytechnic University.
Design Engineer,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: polyakovmir91@gmail.com

Anton S. Dmitrienko

Principal engineer,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

Olga Yu. Zav'yalova

PhD, Head of laboratory,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

Vladimir P. Lyanzburg

PhD, deputy chief designer, head of department,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

German N. Gladyshev

PhD, till 2017 – Head of laboratory,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

Nikolay N. Balkovoy

Principal engineer,
Stock Company «Scientific & Industrial Centre «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

УДК 534.1:621.313

М.В. Поляков, А.А. Липовцев, П.А. Алексанов

Математическая модель гибкого несимметричного ротора электродвигателя-маховика с активным магнитным подвесом

Предложена математическая модель ротора электродвигателя-маховика с активным магнитным подвесом, используемого в качестве исполнительного органа системы ориентации и стабилизации космического аппарата. Модель позволяет определять критические скорости и амплитуды колебаний ротора с учетом форм его собственных колебаний. Ротор рассматривается как двухмассовая система, состоящая из вала и обода, активные магнитные подшипники моделируются линейными упругими элементами. Уравнения движения ротора получены решением уравнения Лагранжа. Верификация модели проводилась сравнением расчетных диаграмм Кэмпбелла с результатами конечно-элементного модального анализа в среде ANSYS.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, критическая скорость, диаграмма Кэмпбелла, электродвигатель-маховик.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-115-120

Микровибрации в космических аппаратах

Постоянное усложнение задач, решаемых современными космическими аппаратами (КА), требует повышения эксплуатационных характеристик их систем ориентации и стабилизации, в первую очередь точности и, что не менее важно, стабильности ориентации целевой аппаратуры в пространстве. Данные параметры являются ключевыми для прецизионных оптических и астрофизических приборов, используемых на спутниках дистанционного зондирования Земли, в орбитальных обсерваториях и телескопах, предназначенных для исследования межзвездного пространства. Нормальное функционирование таких изделий требует, чтобы стабильность их положения, обеспечиваемая системой ориентации, значительно превосходила их разрешающую способность.

Необходимость повышения точности и стабильности ориентации КА приводит к тому, что в настоящее время все больше внимания уделяется проблеме микровибраций и возмущающих силомоментных воздействий [1–8]. Основным источником вибровозмущений на КА является бортовое электромеханическое оборудование: приводы поворота антенн, солнечных батарей и др. Также весомый вклад вносят электродвигатели-маховики (ЭДМ) и силовые гироскопы системы ориентации и стабилизации, поскольку они функционируют практически постоянно в течение всего срока активного существования КА [3–5]. Микровибрации, генерируемые функционирующим бортовым оборудованием, распространяются по несущей конструкции КА и нарушают работу прецизионной аппаратуры. При этом бортовые вибрации КА лежат преимущественно в диапазоне $1\text{--}10^3$ Гц, поэтому не могут отрабатываться с помощью самой системы ориентации, поскольку ее полоса пропускания обычно составляет менее 1 Гц [4, 5]. Одним из примеров негативного влияния микровибраций является искажение фотоснимков [3] поверхности Земли (рис. 1).

Существуют основные способы снижения влияния вибровозмущений на характеристики прецизионных бортовых изделий.



Рис. 1. Искажение фотоснимка вследствие воздействия микровибраций [3]

Во-первых, проектирование КА таким образом, чтобы модуль полезной нагрузки был в меньшей степени подвержен влиянию микровибраций, в том числе механически изолирован от несущей конструкции КА [3, 9, 10]. Примером является геостационарный метеоспутник GOES-R (США), в котором полезная нагрузка размещалась на специальной платформе, изолированной от остального аппарата с помощью шести виброизоляторов D-strut компании Honeywell, обеспечивающих подавление вибраций на частотах более 5 Гц.

Во-вторых, применение специальных алгоритмов постобработки информации, получаемой с чувствительных приборов [3]. Это позволяет в некоторой степени уменьшить влияние микровибраций, однако алгоритмы постобработки здесь достаточно сложны, а их эффективность ограничена.

В-третьих, снижение уровней вибраций, генерируемых функционирующим оборудованием, в том числе и его виброизоляция от корпуса КА [11, 12].

Причинами возмущающих воздействий ЭДМ как одного из основных источников микровибраций на борту КА являются [4, 13]:

– подшипниковые вибрации, характеризующиеся отклонениями геометрической формы и размеров подшипников от идеальных, а также зазорами в подшипниковом узле;

– остаточная неуравновешенность ротора, определяемая точностью его балансировки.

Кроме того, имеются пульсации управляющего момента ЭДМ, обусловленные пульсациями электромагнитного момента электродвигателя и момента сопротивления подшипников, которые также являются источниками микровибраций [4].

Таким образом, генерирование вибровозмущений ЭДМ преимущественно связано с шариковыми подшипниками. Следовательно, один из возможных путей уменьшения такого воздействия – их замена на бесконтактные опоры, наиболее предпочтительным вариантом которых является активный магнитный подвес (АМП) ротора [14, 15]. АМП представляет собой мехатронную систему, состоящую из объекта регулирования (ротора), исполнительных устройств (электромагнитных подшипников), датчиков обратной связи и системы управления. Эффективное снижение возмущающих воздействий требует, помимо прочего, разработки математической модели объекта управления – ротора, учитывающей формы его собственных колебаний, поскольку они определяют критические частоты вращения и амплитуды вынужденных колебаний в зазоре [16–18].

Математическая модель ротора ЭДМ

Ротор ЭДМ состоит из маховика, на котором установлены вращающиеся элементы электродвигателя и АМП. Для обеспечения оптимальных массогабаритных характеристик ротора (максимального осевого момента инерции J_0 при минимально возможной массе M) маховик выполняется в виде массивного обода, который соединен с валом достаточно тонкой диафрагмой. Результаты модального анализа ротора ЭДМ для случая абсолютно жестких опор показывают, что его первая собственная частота обычно связана с угловыми колебаниями обода и диафрагмы вокруг поперечной оси (рис. 2) и имеет достаточно низкое значение, которое может лежать в рабочем диапазоне частоты вращения.

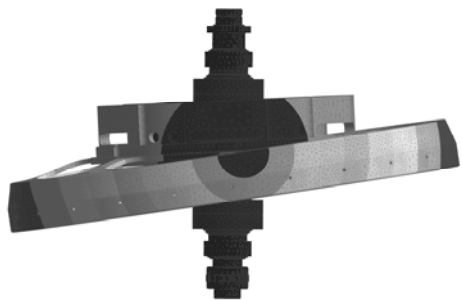


Рис. 2. Форма колебаний ротора ЭДМ на первой собственной частоте

Данная форма колебаний позволяет рассматривать ротор ЭДМ как двухмассовую систему, состоящую из вала и обода. Вал характеризуется массой M_b , полярным и экваториальными моментами инерции $J_{o,b}$, $J_{э,b}$, обод – массой M_o и моментами инерции $J_{o,o}$, $J_{э,o}$. Исходя из результатов модального анализа, в системе имеются следующие связи: линейные перемещения и вращение вокруг собственной оси осу-

ществляются валом и ободом совместно (связи абсолютно жесткие), угловые смещения обода относительно вала вокруг поперечных осей характеризуются угловой жесткостью R_d , равной

$$R_d = (2\pi f_{сд})^2 J_{э,o}, \tag{1}$$

где $f_{сд}$ – собственная частота угловых колебаний обода и диафрагмы, Гц (см. рис. 2).

Вводятся следующие системы координат: XYZ – приборная система координат ЭДМ; $Ox_b Y_b Z_b$ – вращающаяся система координат, связанная с валом ротора; $Ox_o Y_o Z_o$ – вращающаяся система координат, связанная с ободом ротора. $Oxyz$, $Ox'_b Y'_b Z'_b$, $Ox''_o Y''_o Z''_o$, $Ox'''_o Y'''_o Z'''_o$ – промежуточные положения вала и обода после линейных и угловых перемещений (рис. 3). Таким образом, с учетом имеющихся связей положение вала и обода ротора ЭДМ характеризуется восемью обобщенными координатами: линейными перемещениями x, y, z вала вместе с ободом, собственным вращением $\psi = \omega t$, поворотами вала и обода вокруг осей X, Y на углы ϕ_b, θ_b и ϕ_o, θ_o соответственно (см. рис. 3).

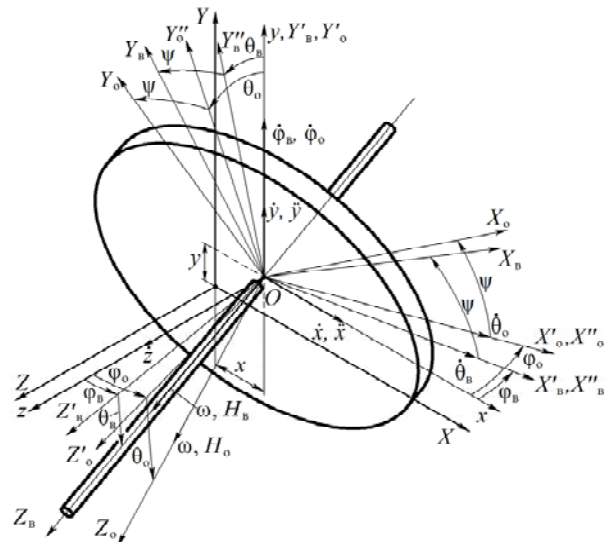


Рис. 3. Модель гибкого ротора ЭДМ

Математическая модель ротора ЭДМ представляет собой решения уравнения Лагранжа для каждой обобщенной координаты q :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0, \tag{2}$$

где $L=T-P$ – функция Лагранжа. Соответственно T, P – кинетическая и потенциальная энергии системы «ротор–АМП».

Проекции векторов угловой скорости вала и обода $\omega_{b(o)}$ на оси вращающихся систем координат $Ox_b Y_b Z_b$ и $Ox_o Y_o Z_o$

$$\omega_{b(o)} = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_{b(o)} \cos \omega t + \dot{\phi}_{b(o)} \cos \theta_{b(o)} \sin \omega t \\ \dot{\phi}_{b(o)} \cos \theta_{b(o)} \cos \omega t - \dot{\theta}_{b(o)} \sin \omega t \\ \omega - \dot{\phi}_{b(o)} \sin \theta_{b(o)} \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Вследствие малости углов $\phi_b, \theta_b, \phi_o, \theta_o$ справедлива замена $\cos \theta_{b(o)} \approx 1, \sin \theta_{b(o)} \approx \theta_{b(o)}$:

$$\omega_{B(O)} = \begin{vmatrix} \dot{\theta}_{B(O)} \cos \omega t + \dot{\phi}_{B(O)} \sin \omega t \\ \dot{\phi}_{B(O)} \cos \omega t - \dot{\theta}_{B(O)} \sin \omega t \\ \omega - \dot{\phi}_{B(O)} \theta_{B(O)} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Поскольку оси систем координат совпадают с главными осями инерции, то выражение для кинетической энергии можно записать в виде

$$T = \frac{1}{2} \left[M(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + J_{\Sigma B}(\omega_{BX}^2 + \omega_{BY}^2) + J_{\Sigma O}(\omega_{OZ}^2 + \omega_{OY}^2) + J_{\Sigma O}(\omega_{OX}^2 + \omega_{OZ}^2) \right]. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5), получим

$$T = \frac{1}{2} \left\{ M(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + J_{\Sigma B} \left[(\dot{\theta}_B \cos \omega t + \dot{\phi}_B \sin \omega t)^2 + (\dot{\phi}_B \cos \omega t - \dot{\theta}_B \sin \omega t)^2 \right] + J_{\Sigma O}(\omega - \dot{\phi}_B \theta_B)^2 + J_{\Sigma O} \left[(\dot{\theta}_O \cos \omega t + \dot{\phi}_O \sin \omega t)^2 + (\dot{\phi}_O \cos \omega t - \dot{\theta}_O \sin \omega t)^2 \right] + J_{\Sigma O}(\omega - \dot{\phi}_O \theta_O)^2 \right\}. \quad (6)$$

Перейдем к определению потенциальной энергии системы P . Поскольку на данном этапе стоит задача рассмотрения и идентификации динамических характеристик только ротора, то радиальные и осевой электромагнитные подшипники достаточно представить в виде идеально упругих изотропных опор, характеризуемых коэффициентами жесткости C_A , C_B и C_Z . Такое допущение, во-первых, позволяет исключить влияние электромагнитных процессов в АМП и алгоритмов системы управления и выделить интересующие характеристики ротора, а во-вторых, оно дает возможность сравнить аналитические результаты, полученные при решении разработанной модели ротора, с результатами его конечно-элементного модального анализа. Таким образом, потенциальная энергия P системы «ротор–АМП» сосредоточена в упругих элементах C_A , C_B и C_Z , а также в упругой связи вала и обода R_d , поэтому с учетом малости углов ϕ_B , θ_B и ϕ_O , θ_O

$$P = \frac{1}{2} \left[C_A(x + a\phi_B)^2 + C_B(x - b\phi_B)^2 + C_Z z^2 + C_A(y + a\theta_B)^2 + C_B(y - b\theta_B)^2 + R_d(\phi_O - \phi_B)^2 + R_d(\theta_O - \theta_B)^2 \right], \quad (7)$$

где a , b – расстояния от центра масс ротора до радиальных электромагнитных подшипников (в случае несимметричного ротора $a \neq b$).

Производные лагранжиана по каждой обобщенной координате:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = M\ddot{x} + Cx + N\phi_B; \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = M\ddot{y} + Cy + N\theta_B; \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial L}{\partial z} = M\ddot{z} + C_Z z; \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_B} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi_B} =$$

$$= J_{\Sigma B} \ddot{\phi}_B + J_{\Sigma O} \omega \dot{\theta}_B + Nx + (R_B + R_d)\phi_B - R_d \phi_O; \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_O} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi_O} =$$

$$= J_{\Sigma O} \ddot{\phi}_O + J_{\Sigma O} \omega \dot{\theta}_O + R_d \phi_O - R_d \phi_B; \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_B} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_B} =$$

$$= J_{\Sigma B} \ddot{\theta}_B - J_{\Sigma O} \omega \dot{\phi}_B + Ny + (R_B + R_d)\theta_B - R_d \theta_O; \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_O} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_O} =$$

$$= J_{\Sigma O} \ddot{\theta}_O - J_{\Sigma O} \omega \dot{\phi}_O + R_d \theta_O - R_d \theta_B; \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi} = (J_{\Sigma B} + J_{\Sigma O}) \ddot{\psi}, \quad (15)$$

где $C = C_A + C_B$; $N = C_A a - C_B b$; $R_B = C_A a^2 + C_B b^2$.

Таким образом, математическая модель вынужденных колебаний ротора под действием сил $F_x(t)$, $F_y(t)$, $F_z(t)$ и моментов сил $M_x(t)$, $M_y(t)$, $M_z(t)$ имеет вид

$$\begin{cases} M\ddot{x} + Cx + N\phi_B = F_x(t); \\ M\ddot{y} + Cy + N\theta_B = F_y(t); \\ M\ddot{z} + C_Z z = F_z(t); \\ J_{\Sigma B} \ddot{\phi}_B + J_{\Sigma O} \omega \dot{\theta}_B + Nx + (R_B + R_d)\phi_B - R_d \phi_O = M_y(t); \\ J_{\Sigma O} \ddot{\phi}_O + J_{\Sigma O} \omega \dot{\theta}_O + R_d \phi_O - R_d \phi_B = M_y(t); \\ J_{\Sigma B} \ddot{\theta}_B - J_{\Sigma O} \omega \dot{\phi}_B + Ny + (R_B + R_d)\theta_B - R_d \theta_O = M_x(t); \\ J_{\Sigma O} \ddot{\theta}_O - J_{\Sigma O} \omega \dot{\phi}_O + R_d \theta_O - R_d \theta_B = M_x(t); \\ (J_{\Sigma B} + J_{\Sigma O}) \ddot{\psi} = M_z(t). \end{cases} \quad (16)$$

Из анализа уравнений (16) видно, что вследствие несимметричности системы «ротор–АМП» (побочная жесткость $N = C_A a - C_B b \neq 0$) существует связанность между поперечными поступательными и угловыми колебаниями ротора. Третье из уравнений описывает обычные осевые колебания одномассовой системы, последнее уравнение – закон формирования управляющего момента, приложенного к корпусу КА. При принятых в модели допущениях данные уравнения не зависят от поперечных поступательных и угловых колебаний, поэтому при дальнейших исследованиях не рассматриваются.

Результаты расчета

Верификация математической модели гибкого несимметричного ротора проводилась сравнением диаграмм Кэмпбелла, полученных при решении системы уравнений (16), с результатами конечно-элементного модального анализа в среде ANSYS (рис. 4, 5).

Несимметричная система может иметь три критические частоты (см. рис. 4, 5), на каждой из которых ротор совершает сложное поступательно-угловое движение, сопровождающееся собственны-

ми колебаниями. Расчетные значения критических частот совпадают с результатами моделирования с относительной погрешностью менее 1% (таблица).

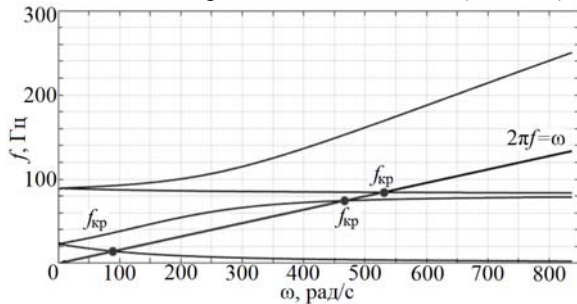


Рис. 4. Расчетная диаграмма Кэмпбелла

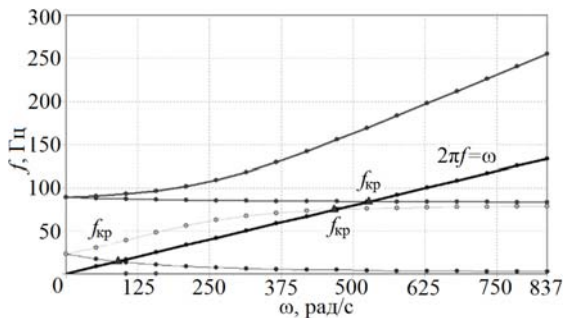


Рис. 5. Диаграмма Кэмпбелла по результатам модального анализа в ANSYS

Критические скорости в рабочем диапазоне частот вращения ротора

Форма колебаний	Критическая скорость, рад/с		Относительная погрешность, %
	Расчет	ANSYS	
Угловые колебания, обратная прецессия	91,1	90,6	0,55
Угловые колебания, прямая прецессия	469,8	467,1	0,58
Радиальные колебания	533,4	529,8	0,68

Разработанная модель корректно описывает и предельные случаи абсолютно жесткого ротора на упругих опорах и гибкого ротора на абсолютно жестких опорах, динамические уравнения которых известны из технической литературы [19]. Первый вариант соответствует условию $R_b \ll R_d$, для него $\varphi_d = \varphi_b = \varphi_p$ и $\theta_d = \theta_b = \theta_p$, что позволяет «свернуть» уравнения угловых колебаний вала и обода в одно уравнение угловых колебаний ротора:

$$\begin{cases} M\ddot{x} + Cx + N\varphi_p = F_x(t); \\ M\ddot{y} + Cy + N\theta_p = F_y(t); \\ M\ddot{z} + C_z z = F_z(t); \\ J_{\Sigma,p}\ddot{\varphi}_p + J_{O,p}\omega\dot{\varphi}_p + Nx + R_b\varphi_p = M_y(t); \\ J_{\Sigma,p}\ddot{\theta}_p - J_{O,p}\omega\dot{\theta}_p + Ny + R_b\theta_p = M_x(t); \\ J_{\Sigma,p}\ddot{\psi} = M_z(t). \end{cases} \quad (17)$$

Второму варианту соответствует соотношение $R_b \gg R_d$, в нем $x = y = 0$, $\varphi_b = \theta_b = 0$, что позволяет ограничиться только уравнениями угловых колебаний обода-диафрагмы:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + C_z z = F_z(t); \\ J_{\Sigma,o}\ddot{\varphi}_o + J_{O,o}\omega\dot{\varphi}_o + R_d\varphi_o = M_y(t); \\ J_{\Sigma,o}\ddot{\theta}_o - J_{O,o}\omega\dot{\theta}_o + R_d\theta_o = M_x(t); \\ J_{\Sigma,p}\ddot{\psi} = M_z(t). \end{cases} \quad (18)$$

Таким образом, соотношение угловых жесткостей радиального подвеса R_b и диафрагмы ротора R_d определяет степень участия массы ротора в угловых колебаниях: при $R_b \ll R_d$ колебания совершаются всем ротором, при $R_b \gg R_d$ колеблются только его обод и диафрагма.

«Симметризация» радиального подвеса

Выше был рассмотрен общий случай несимметричной системы «ротор-АМП», для которой $C_{Aa} \neq C_{Bb}$.

Отличительной особенностью АМП является возможность достаточно точного регулирования жесткостей электромагнитных подшипников, что позволяет относительно просто привести изначально несимметричную систему к симметричной, для которой $C_{Aa} = C_{Bb}$ и побочная жесткость N равна нулю:

$$\begin{cases} M\ddot{x} + Cx = F_x(t); \\ M\ddot{y} + Cy = F_y(t); \\ M\ddot{z} + C_z z = F_z(t); \\ J_{\Sigma,b}\ddot{\varphi}_b + J_{O,b}\omega\dot{\varphi}_b + (R_b + R_d)\varphi_b - R_d\varphi_o = M_y(t); \\ J_{\Sigma,o}\ddot{\varphi}_o + J_{O,o}\omega\dot{\varphi}_o + R_d\varphi_o - R_d\varphi_b = M_y(t); \\ J_{\Sigma,b}\ddot{\theta}_b - J_{O,b}\omega\dot{\theta}_b + (R_b + R_d)\theta_b - R_d\theta_o = M_x(t); \\ J_{\Sigma,o}\ddot{\theta}_o - J_{O,o}\omega\dot{\theta}_o + R_d\theta_o - R_d\theta_b = M_x(t); \\ (J_{O,b} + J_{O,o})\ddot{\psi} = M_z(t). \end{cases} \quad (19)$$

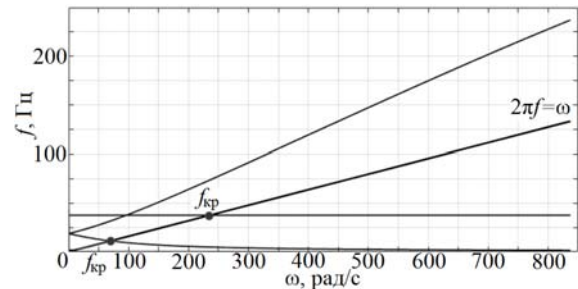


Рис. 6. Расчетная диаграмма Кэмпбелла

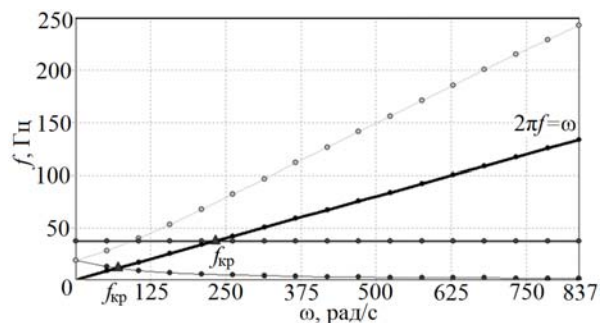


Рис. 7. Диаграмма Кэмпбелла по результатам модального анализа в ANSYS

В такой системе практически отсутствует связанность поступательных и угловых перемещений,

поэтому она, в отличие от несимметричной, имеет максимум две критические частоты (рис. 6, 7) и для нее требуются более простые алгоритмы управления.

Выводы

Разработанная математическая модель позволяет определять собственные частоты и критические скорости гибкого несимметричного ротора ЭДМ с АМП. Погрешность разработанной модели в сравнении с результатами конечно-элементного моделирования составляет менее 1%, что позволяет использовать ее при дальнейшем исследовании динамических характеристик системы электромагнитного подвеса и ее оптимизации.

Литература

1. European space agency – ESA new reaction wheel characterization test facility (RCF) / M. Wagner, S. Airey, G. Piret, P. Le // 35th Annual AAS Guidance and Control Conference. – 2012. – AAS 12-077.
2. Vitelli M. A process to verify the microvibration and pointing stability requirements for the BepiColombo mission / M. Vitelli, B. Specht, F. Boquet // International Workshop on Instrumentation for planetary missions. – 2012. – P. 1–5.
3. Managing reaction wheel microvibration on a high resolution EO small spacecraft / G. Smet, G. Richardson, S. McLaren, A. Haslehurst // 15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium. – 2013. – P. 1–8.
4. Le M.P. Micro-disturbances in reaction wheels // PhD dissertation. – Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2017. – 166 p.
5. Komatsu K. Microvibration in spacecraft / K. Komatsu, H. Uchida // Mechanical Engineering Reviews. – 2014. – Vol. 1, issue 2. – P. SE0010. – doi: 10.1299/mer.2014se0010
6. Microvibration performance prediction of SEPTA24 using SMESIM (RUAG space mechanism simulator tool) / M. Omiciuolo [et al.] // 15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium. – 2013. – P. 1–8.
7. Hahn R. Simulating and analysing the microvibration signature of reaction wheels for future non-intrusive health monitoring methods / R. Hahn, R. Seiler // 14th European Space Mechanisms & Tribology Symposium. – 2011. – P. 415–422.
8. Кузнецов, Д.А. Подход к решению вопроса по прогнозу уровней возмущений для электромаховичных исполнительных органов / Д.А. Кузнецов, П.П. Телепнев, В.Ю. Ермаков // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. – 2016. – № 3 (33). – С. 116–119.
9. Development of a dual mode D-Strut vibration isolator for a laser communication terminal / D.T. Ruebsamen, J. Boyd, J. Vecera, R. Nagel // Proc. of the 38th Aerospace Mechanisms Symposium. – 2006. – P. 141–148.
10. Dual stage isolation – a passive bi-linear application for launch load attenuation and on-orbit jitter mitigation / J. Howat et al. // Proc. ESMATS. – 2017. – P. 1–8.
11. Carte G. Reaction wheel vibration isolator with elastomeric stoppers for launch load // Proc. 13th European Conf. on Spacecraft Structures, Materials & Environmental Testing. – 2014. – P. 1–5.
12. Kamesh D. Passive vibration isolation of reaction wheel disturbances using a low frequency flexible space platform / D. Kamesh, R. Pandiyan, A. Ghosal // Journal of Sound and Vibration. – 2012. – No. 331. – P. 1310–1330.
13. Никифоров А.Н. Проблемы колебаний и динамической устойчивости быстровращающихся роторов // Вестник науч.-техн. развития. – 2010. – № 3 (31). – С. 31–53.
14. Bichler U. A gimballed low noise momentum wheel / U. Bichler, T. Eckardt // NASA conference publication of the 27th aerospace mechanisms symp. – 1993. – P. 181–196.
15. Development of low disturbance magnetic bearing wheel (MBW) with inclined magnetic poles / M. Saito et al. // 7th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems. – 2008. – P. 1–16.
16. Сарычев А.П. Математическая модель ротора для анализа управления магнитными подшипниками / А.П. Сарычев, И.Г. Руковицын // Вопросы электромеханики. – 2008. – Т. 107. – С. 11–15.
17. Абдурагимов А.С. Идентификация динамических свойств ротора в системе магнитного подвеса / А.С. Абдурагимов, В.П. Верещагин, А.В. Рогоза // Вопросы электромеханики. – 2014. – Т. 143. – С. 7–10.
18. Овчинников В.Ф. Нелинейные резонансные колебания гибкого ротора на электромагнитном подвесе при наличии дисбаланса / В.Ф. Овчинников и др. // Вестник Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – № 5 (1). – С. 171–178.
19. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.

Поляков Мирослав Вадимович

Инженер-конструктор АО «НПЦ «Полус», Томск, аспирант Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности (ИШ НКИБ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-66-52
Эл. почта: polyakovmir91@gmail.com

Липовцев Анатолий Анатольевич

Начальник лаборатории АО «НПЦ «Полус», Томск Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-66-52
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Алексанов Павел Александрович

Зам. нач. отд. АО «НПЦ «Полус», Томск Кирова пр-т, д. 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-66-52
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Polyakov M.V., Lipovtsev A.A., Aleksanov P.A.

Mathematical model of a flexible asymmetrical rotor for active magnetic bearing reaction wheel

The paper introduces the mathematical model of rotor for active magnetic bearing reaction/momentum wheels, used as actuator in spacecraft attitude and orbit control system. Developed model is used for estimation of critical speeds and forced oscillation magnitudes with a glance of the rotor modes. Rotor is considered as a two-mass system, consisting of a shaft and a rim, active magnetic bearings are assumed to be a linear elastic springs. The equations of the rotor motion are derived using the Lagrange equation. Developed model is verified by comparing the calculated Campbell diagrams with the results

of the finite-element modal analysis, performed in the ANSYS software.

Keywords: electromagnetic bearing, critical speed, Campbell diagram, reaction wheel.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-115-120

References

1. Wagner M., Airey S., Piret G., Le P. European space agency – ESA new reaction wheel characterization test facility (RCF). *35th Annual AAS Guidance and Control Conference*, 2012, AAS 12-077.

2. Vitelli M., Specht B., Boquet F. A process to verify the microvibration and pointing stability requirements for the BepiColombo mission. *International Workshop on Instrumentation for planetary missions*, 2012, pp. 1–5.

3. Smet G., Richardson G., McLaren S., Haslehurst A. Managing reaction wheel microvibration on a high resolution EO small spacecraft. *15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium*, 2013, pp. 1–8.

4. Le M.P. Micro-disturbances in reaction wheels. *PhD dissertation. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven*, 2017, 166 p.

5. Komatsu K., Uchida H. Microvibration in spacecraft. *Mechanical Engineering Reviews*, 2014, vol. 1, is. 2, p. SE0010. doi: 10.1299/mer.2014se0010

6. Omiciuolo M., Lang A., Wismer S., Barth S., Szekely G. Micro-vibration performance prediction of SEPTA24 using SMESIM (RUAG space mechanism simulator tool). *15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium*, 2013, pp. 1–8.

7. Hahn R., Seiler R. Simulating and analysing the microvibration signature of reaction wheels for future non-intrusive health monitoring methods. *14th European Space Mechanisms & Tribology Symposium*, 2011, pp. 415–422.

8. Kuznetsov D.A., Telepnev P.P., Ermakov V.Yu. [The approach to the issue of predicted perturbation levels for electric flywheel electric actuators]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2016, no. 3 (33), pp. 116–119 (in Russ.).

9. Ruebsamen D.T., Boyd J., Vecera J., Nagel R. Development of a dual mode D-Strut vibration isolator for a laser communication terminal. *Proc. of the 38th Aerospace Mechanisms Symposium*, 2006, pp. 141–148.

10. Howat J., Wilke P., Mimovich M., Allen B., Borst C., Takei Y., Yasuda S., Ishimura K. Dual stage isolation – a passive bi-linear application for launch load attenuation and on-orbit jitter mitigation. *Proc. ESMATS 2017*, 2017, pp. 1–8.

11. Carte G. Reaction wheel vibration isolator with elastic stoppers for launch load. *Proc. 13th European Conf. on Spacecraft Structures, Materials & Environmental Testing*, 2014, pp. 1–5.

12. Kamesh D., Pandiyan R., Ghosal A. Passive vibration isolation of reaction wheel disturbances using a low frequency flexible space platform. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, no. 331, pp. 1310–1330.

13. Nikiforov A.N. [Oscillations, dynamic stability and vibration damping problems of high-speed rotors]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya*, 2010, no. 3 (31), pp. 31–53 (In Russ.).

14. Bichler U., Eckardt T. A gimbaled low noise momentum wheel. *NASA conference publication of the 27th aerospace mechanisms symp*, 1993, pp. 181–196.

15. Saito M., Fukushima K., Sato N., Izawa K., Hashimoto T., Nakajima A. Development of low disturbance magnetic bearing wheel (MBW) with inclined magnetic poles. *7th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems*, 2008, pp. 1–16.

16. Sarychev A.P., Rukovitsyn I.G. [Mathematical model of rotor for the analysis of the magnetic bearing control]. *Voprosy elektromekhaniki*, 2008, vol. 107, pp. 11–15 (In Russ.).

17. Abduragimov A.S., Vereshchagin V.P., Rogoza A.V. [Identification of rotor dynamics in the magnetic suspension system]. *Voprosy elektromekhaniki*, 2014, vol. 143, pp. 7–10 (In Russ.).

18. Ovchinnikov V.F., Kiryushina E.V., Nikolaev M.Ya., Fadeeva E.V., Chistov A.S., Litvinov V.N., Mitenkov F.M., Kodochigov N.G., Malkin S.A. [Nonlinear resonance oscillations of an unbalanced electromagnetically suspended flexible rotor]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2013, no. 5 (1), pp. 171–178 (In Russ.).

19. Zhuravlev Yu. N. *Aktivnye magnitnye podshipniki: Teoriya, raschet, primenenie*. [Active magnetic bearings: Theory, design, application]. St.Petersburg, Politehnika, 2003, 206 p.

Miroslav V. Polyakov

PhD student, School of Non-destructive testing & Security, National Research Tomsk Polytechnic University.
Design Engineer, SC «SIC «Polyus», Tomsk
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: polyakovmir91@gmail.com

Anatoliy A. Lipovtsev

Head of laboratory, SC «SIC «Polyus», Tomsk
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

Pavel A. Aleksanov

Deputy head of department, SC «SIC «Polyus», Tomsk
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-66-52
Email: info@polus-tomsk.ru

УДК 681.518.3; 004.3'12

В.А. Пасько, А.А. Сосин, В.П. Лянзбург

Преобразование частоты вращения двигателя-маховика в код

Преобразование частоты вращения двигателя-маховика в код является важной задачей при контроле основных характеристик в системах ориентации и стабилизации космических аппаратов. Существующие методы преобразования не обеспечивают необходимого быстродействия и точности в работе системы. Предлагается решение сложившейся проблемы путем простых тригонометрических преобразований. Рассмотрен принцип построения такой системы, разработаны алгоритм ее работы и средства реализации. Приведены результаты исследования преобразователя для оценки работоспособности и соответствия его необходимым требованиям к данному виду систем.

Ключевые слова: двигатель-маховик, преобразование, частота вращения, код, ПЛИС, кинетический момент, угловая скорость, знак направления вращения.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-121-125

Для контроля кинетического момента и угловой скорости двигателей-маховиков (ДМ) используется частотный сигнал, формируемый датчиком положения ротора. В режиме управления угловая скорость ДМ изменяется в рабочем диапазоне между крайними положительным и отрицательным значениями и может принимать нулевое и близкое к нулю значение. Исходя из этого ставится задача преобразования в код частоты сигнала угловой скорости f_x в широком диапазоне, в том числе в области нуля с формированием знака скорости. Применение известных методов прямого и обратного счета для преобразования частоты в код [1–4] в данном случае практически невозможно из-за неопределенно большого интервала преобразования при близких к нулю значениях частоты, что неприемлемо для управления ДМ. Предлагается решение данной проблемы путем суммирования частоты f_x с некоторой постоянной частотой f_o , в результате чего кодируемый период $T_{ox} = 1/(f_o + f_x)$ имеет конечные значения: максимальное $T_{oxmax} = 1/f_o$ и минимальное $T_{oxmin} = 1/(f_o + f_{xmax})$, где f_{xmax} – максимальное значение частоты.

Функциональная схема и алгоритм работы

На функциональной схеме устройства, работа которого основана на этом принципе (рис. 1), ДПР –

датчик положения ротора; АЦП1, АЦП2 – аналого-цифровые преобразователи; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема, включающая в себя преобразователь частоты (ПЧ), синусно-косинусный генератор опорной частоты (ГОЧ), формирователь кода периода (ФКП); flash-память (flash). $N_{T_{ox}}$ – код периода сигналов $\sin(\omega_x t + \omega_o t)$ и $\cos(\omega_x t + \omega_o t)$, где $\omega_x = 2\pi f_x$, $\omega_o = 2\pi f_o$; N_{ox} – код частоты сигналов ДПР.

Сигналы с выхода ДПР ДМ $\sin(\omega_x t)$, $\cos(\omega_x t)$ поступают на вход микросхем АЦП1, АЦП2, которые оцифровывают эти сигналы и передают на вход ПЛИС для дальнейших преобразований.

Преобразуемая частота вращения увеличивает на фиксированную опорную частоту $f_o = 100$ Гц. Увеличение происходит при помощи тригонометрических преобразований, получивших широкое распространение в цифровой обработке сигналов [5–7]. ГОЧ, реализованный в ПЛИС, формирует сигналы $\sin(\omega_o t)$, $\cos(\omega_o t)$, которые используются для формирования сигналов $\sin(\omega_x t + \omega_o t)$, $\cos(\omega_x t + \omega_o t)$ согласно выражениям

$$\sin(\omega_x t + \omega_o t) = \sin(\omega_x t)\cos(\omega_o t) + \sin(\omega_o t)\cos(\omega_x t);$$

$$\cos(\omega_x t + \omega_o t) = \cos(\omega_x t)\cos(\omega_o t) - \sin(\omega_x t)\sin(\omega_o t).$$

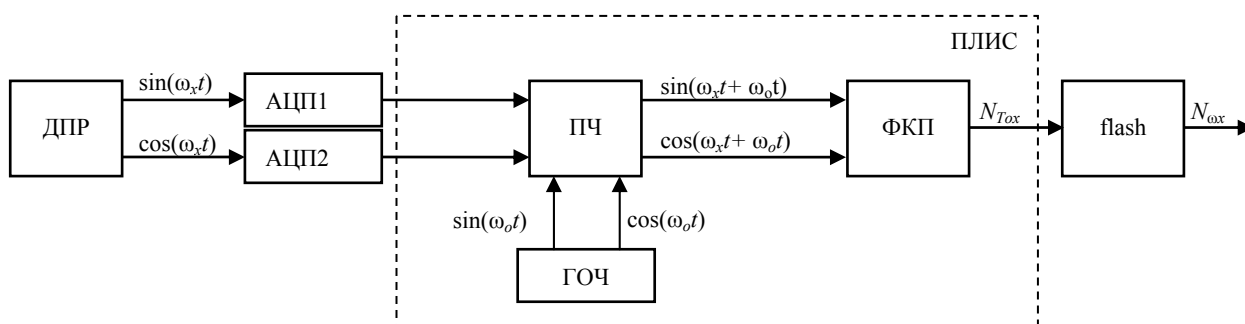


Рис. 1. Функциональная схема преобразователя частота–код

В моменты перехода полученных сигналов через нуль происходит формирование импульсов короткой длительности (ИКД), которые служат разрешающим сигналом для ФКП. За временной проме-

жутком, определяемый моментами перехода через нуль сигналов $\sin(\omega_x t + \omega_o t)$, $\cos(\omega_x t + \omega_o t)$, в ФКП происходит подсчет количества импульсов тактовой частоты. Полученное значение является кодом пе-

риода $N_{T_{\text{ох}}}$ указанных сигналов и используется в качестве адреса ячейки flash-памяти. Все возможные значения кодов частоты вращения хранятся в виде таблицы в микросхеме flash-памяти. В конце цикла преобразования в ПЛИС запускается процедура считывания значений кодов частоты $N_{\text{ох}}$ из flash-памяти с последующей их выдачей. В результате на выходе преобразователя формируется 16-разрядный двоичный код частоты сигналов ДПР (рис. 2).

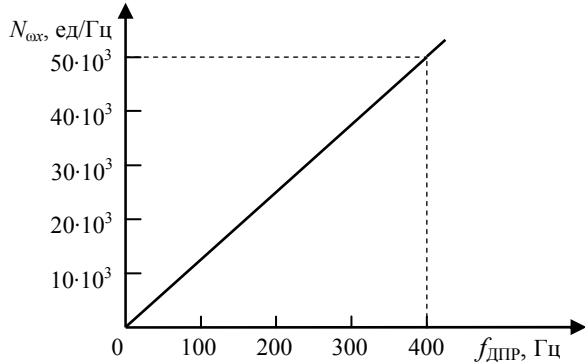


Рис. 2. Зависимость выходного кода от частоты сигналов ДПР

Выбор разрядности выходного кода ограничивается по двум соображениям. При малом количестве разрядов снизится точность преобразования в силу увеличения цены единицы младшего разряда

[8]. При увеличении разрядности возрастают аппаратные затраты на реализацию [9], при том что аппаратные возможности заранее ограничиваются выбранным кристаллом ПЛИС [10]. Исходя из вышесказанного, подобранная разрядность является оптимальной.

Формирование сигнала знака скорости вращения

Согласно алгоритму формирования сигнала знака направления вращения (ЗНВ) при реверсе ДМ (рис. 3) в моменты изменения старших разрядов (с.р.) сигналов $\sin(\omega_x t)$, $\cos(\omega_x t)$ их новые значения сравниваются со значениями с.р. сигналов $\cos(\omega_x t)$ и $\sin(\omega_x t)$ соответственно. При прямом направлении вращения передний фронт с.р. сигнала $\sin(\omega_x t)$ приходится на единицу, а задний – на нуль с.р. сигнала $\cos(\omega_x t)$. Соответственно передний фронт с.р. сигнала $\cos(\omega_x t)$ приходится на нуль, а задний – на единицу с.р. сигнала $\sin(\omega_x t)$. При соблюдении данных условий в моменты изменения сигналов с.р. на линии q_1 формируются сигналы короткой длительности. Если двигатель вращается в обратном направлении, наблюдается противоположная ситуация, а сигналы короткой длительности формируются на линии q_2 . При появлении сигнала на линии q_1 сигналу «ЗНВ» присваивается значение «0», а при появлении на линии q_2 – значение «1».

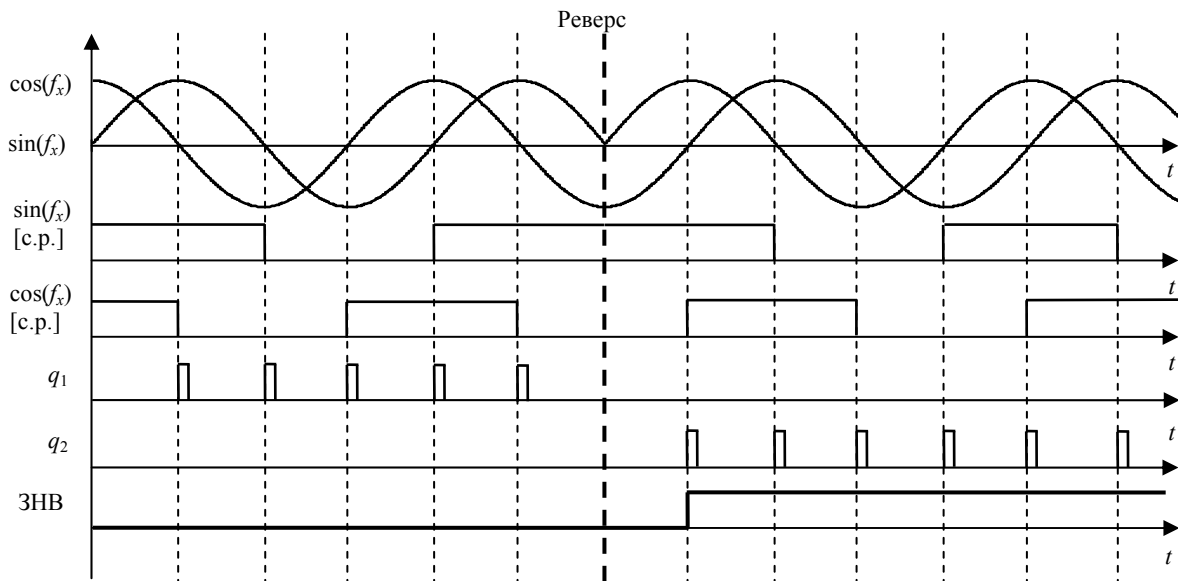


Рис. 3. Алгоритм определения сигнала «ЗНВ»

Экспериментальные исследования

Основой устройства является ПЛИС, что обусловлено ее преимуществами перед микроконтроллерами (МК) [11–13]. В частности, высокие частоты работы, превышающие таковые у МК, обеспечивают высокое быстродействие ПЛИС. Также существенным достоинством является возможность параллельной работы нескольких блоков обработки, тогда как в МК вычисления производятся последовательно, что снижает скорость работы устройства.

Задача, однако, осложняется тем, что стандартные алгоритмы работы с динамически изменяющимися сигналами не дают достаточной точности. Для компенсации этого недостатка необходимо создание более сложных алгоритмов обработки сигналов такого типа [14]. В данном случае разработка алгоритма значительно упрощается тем, что форма сигналов известна заранее, а диапазон изменения частоты вращения ограничен небольшими пределами.

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма была составлена модель в системе автоматизированного проектирования ModelSim-Altera 6.4a [15, 16]. При составлении модели была проведена проверка алгоритма тригонометрических преобразований, отработаны участки разгона, торможения двигателя, а также реверса, разгона и торможения в обратную сторону (рис. 4).

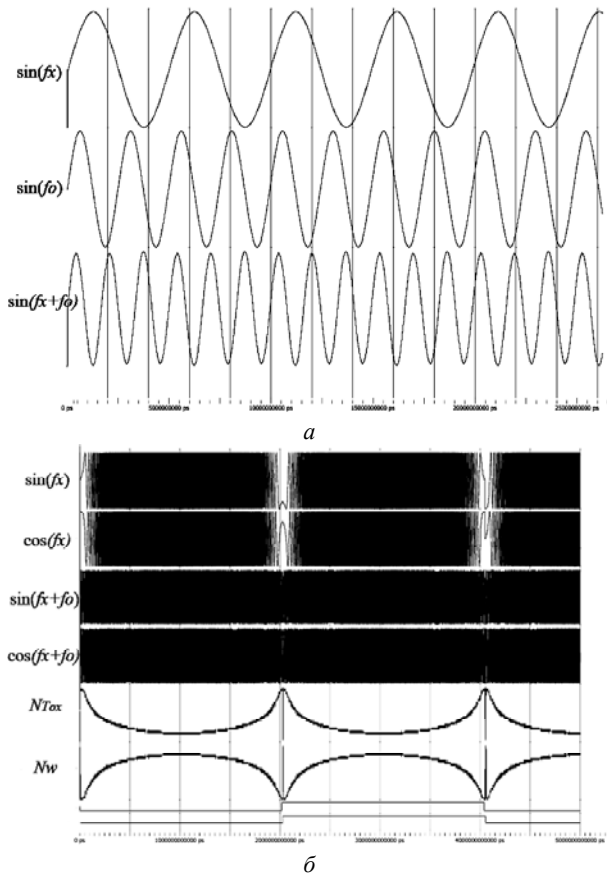
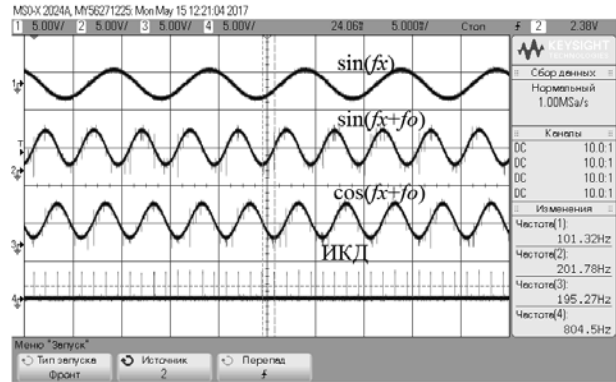


Рис. 4. Результаты моделирования тригонометрических преобразований (а) и цикла разгона-торможения двигателя (б)

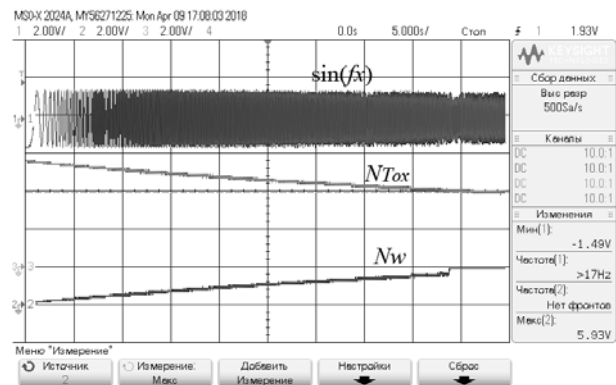
Для реализации представленного решения создан макет на основе ПЛИС фирмы Altera EP4С6Е22С8. Программа для ПЛИС, описывающая приведенный алгоритм, успешно синтезирована и отлажена на языке Verilog HDL с помощью программного обеспечения от фирмы Altera Quartus II 11.1sp2 Web Edition [17]. Результаты исследования макета представлены в виде осциллограмм работы (рис. 5).

Заключение

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного алгоритма, программы, написанной по нему, и стабильность работы собранного макета. Задержка появления сигналов $\sin(\omega_x t + \omega_o t)$, $\cos(\omega_x t + \omega_o t)$ от появления на входе сигналов ДПП составляет около 10 мкс. Время измерения малых частот вращения в основном определяется значением периода опорной частоты f_o и не превышает 2,5 мс. При максимальной частоте вращения двигателя время измерения составляет примерно 500 мкс.



а



б

Рис. 5. Осциллограммы работы устройства: а – тригонометрические преобразования; б – разгон двигателя

Основным достоинством преобразователя является высокое быстродействие во всем диапазоне частот вращения ДМ, в том числе в области близких к нулю значений.

Литература

1. Микросхемы интегральные 1512ПС11Т : технические условия. АЕЯР.431320.599 ТУ. – Минск: ОАО «Интеграл», 2008. – 82 с.
2. Псурцев В. Частотомер на ПЛИС / В. Псурцев, А. Скворцов // Радио. – 2001. – № 7. – С. 22–25.
3. Ревич Ю.В. Практическое программирование Atmel AVR на языке ассемблера. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 368 с.
4. Михайлов А.В. Проектирование цифровых измерительных устройств: учеб. пособие / А.В. Михайлов, М.Г. Родионов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 184 с.
5. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: Бинном-Пресс, 2006. – 656 с.
6. Шумейко А.А. Применение дискретного тригонометрического преобразования в цифровой обработке сигналов / А.А. Шумейко, В.А. Смородский // Современные информационные и электронные технологии. – 2016. – Т. 1, № 17. – С. 10–11.
7. Stork M. Sine Approximation for Direct Digital Frequency Synthesizers and Function Generators // Proceedings of the 3rd International on Circuits, Systems, Control Signals (CSCS'12). – Barcelona, Spain, 2012. – P. 127–132.
8. Смирнов Ю.М. Проектирование специализированных электронно-вычислительных систем: учеб. пособие / Ю.М. Смирнов, Г.Н. Воробьев, Е.С. Потапов, В.В. Сюзев. – М.: Высшая школа, 1984. – 359 с.

9. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 816 с.

10. Головкин А.А. Компьютерное моделирование и проектирование радиоэлектронных средств: учеб. для вузов. Стандарт третьего поколения / А.А. Головкин, И.Ю. Пивоваров, И.Р. Кузнецов. – СПб.: Питер, 2015. – 208 с.

11. Макмуров И. Выбор между микропроцессором и FPGA // Электронные компоненты. – 2011. – № 4. – С. 85–87.

12. Cavill P. FPGA or DSP for military applications? Both have their place // DSP-FPGA.com Product Resource Guide. – 2005. – P. 24–25.

13. Башкирова Л.А. Анализ эффективности применения аппаратных устройств с репрограммируемой структурой / Л.А. Башкирова, А.А. Елисеев, О.В. Зыбкина // Молодой ученый. – 2017. – № 14. – С. 44–48.

14. Вычужанин В.В. Реализация цифровой обработки сигналов переменной точности на ПЛИС // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 3. – С. 62–66.

15. Поляков А.К. Языки VHDL и Verilog в проектирование цифровой аппаратуры. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 320 с.

16. Коршенбойм И. Краткий курс HDL. – Ч. 8: Моделирование в ModelSim SE // Компоненты и технологии. – 2008. – № 11. – С. 139–144.

17. Ефремов Н.В. Введение в систему автоматизированного проектирования Quartus II: учеб. пособие. – М.: ГОУ ВПО МГУИ, 2011. – 147 с.

searches are given to assess the operability and compliance with the necessary requirements for this type of system.

Keywords: flywheel, conversion, flywheel's speed, code, FPGA, kinetic moment, direction sign.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-121-125

References

1. *Mikroshemi integral'nie 1512PS11T tekhnicheskie usloviya AEYAR.431320.599 TU* [Integral microcircuits 1512PS11T technical conditions AEYAR.431320.599 TU]. Minsk, JSC «Integral», 2008, 82 p.

2. Psurcev V., Skvorcov A. Frequency counter on the FPGA. *Radio*, 2001, no. 7, pp. 22–25 (In Russ.).

3. Revich U.V. *Prakticheskoe programmirovaniye Atmel AVR na yazike assemblera* [Practical programming of Atmel AVR on assembler]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2014. 368 p.

4. Mikhailov A.V., Rodionov M.G. *Proektirovaniye tsifrovikh izmeritel'nykh ustroystv: uchebnoye posobie* [Design of digital computing devices. Tutorial]. Omsk, OmGTU Publ., 2007. 184 p.

5. Lyons R. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Understanding Digital Signal Processing]. Moscow, Binom-Press, 2006. 656 p.

6. Shumeiko A.A., Smorodskiy V.A. Application of discrete trigonometric transformation in digital signal processing. *Modern information and electronic technologies*, 2016, vol. 1, no. 17, pp. 10, 11 (In Russ.).

7. Stork M. Sine Approximation for Direct Digital Frequency Synthesizers and Function Generators. *Proceedings of the 3rd International on Circuits, Systems, Control Signals (CSCS'12)*. Barcelona, Spain, 2012, pp. 127–132.

8. Smirnov Y.M., Vorob'ev G.N., Potapov E.S., Syzev V.V. *Proektirovaniye specializirovannykh elektronno-vicheslitel'nykh sistem: uchebnoye posobie* [Design of specialized electronic computing systems. Tutorial]. Moscow, High school, 1984, 359 p.

9. Ugrymov E.P. *Tsifrovaya skhemotekhnika: uchebnoye posobie dlia vuzov* [Digital circuitry. Tutorial]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2010, 816 p.

10. Golovkov A.A., Pivovarov I.Y., Kuznetsov I.R. *Komputernoe modelirovaniye i proektirovaniye radioelektronnykh sredstv. Uchebnik dlia vuzov. Standart tretiego pokoleniya* [Computer modeling and design of electronic means. Tutorial. 3rd generation standard]. St. Petersburg, Piter, 2015, 208 p.

11. Makmurov I. Choice between microprocessor and FPGA. *Electronic components*, 2011, no. 4, pp. 85–87 (In Russ.).

12. Cavill P. FPGA or DSP for military applications? Both have their place. *DSP-FPGA.com Product Resource Guide*, 2005, pp. 24, 25.

13. Bashkirova L.A., Eliseev A.A., Zibkina O.V. Analysis of the effectiveness of the use of hardware devices with a reprogrammable structure. *Young scientist*, 2017, no. 11, pp. 139–144 (In Russ.).

14. Vichuzhanin V.V. Implementation of digital signal processing of variable accuracy on the FPGA. *Digital signal processing*, 2011, no. 3, pp. 62–66 (In Russ.).

15. Polyakov A.K. *Yaziki VHDL i Verilog v proektirovaniye tsifrovoi apparatury* [VHDL and Verilog in design of digital equipment]. Moscow, SOLON-Press, 2003, 320 p.

16. Korshenbojm I. Short course of HDL. Part 8. Modeling in ModelSim SE. *Components and technologies*, 2008, no. 11, pp. 139–144 (In Russ.).

17. Efremov N.V. *Vvedeniye v sistemu avtomatizirovannogo proektirovaniya Quartus II: uchebnoye posobie* [Introduc-

Пасько Василий Алексеевич

Инженер-конструктор 3-й категории АО «НППЦ «Полус»
Кирова пр-т, 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 55-46-94
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Сосин Александр Александрович

Вед. инженер-конструктор АО «НППЦ «Полус»
Кирова пр-т, 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 55-46-94
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Лянзбург Владимир Петрович

Канд. техн. наук, нач. отд. АО «НППЦ «Полус»
Кирова пр-т, 56в, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 55-46-94
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Pasko V.A., Sosin A.A., Lyanzburg V.P.

Conversion of the flywheel speed into the code

The conversion of the flywheel speed into a code is an important task for controlling the main characteristics in the system of orientation and stabilization of spacecrafts. Existing methods of conversion do not provide necessary speed and accuracy in the operation of the system. Solution to the problem is proposed by simple trigonometric transformations. The principle of constructing, an algorithm of its operation, means of implementation such system is considered. Results of re-

tion to the CAD system Quartus II. Tutorial]. Moscow, MSUF, 2011, 147 p.

Alexander A. Sosin
Lead Engineer, JSC «SIC «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 55-46-94
Email: info@polus-tomsk.ru

Vasiliy A. Pasko
Engineer, JSC «SIC «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 55-46-94
Email: paskovasilij@mail.ru

Vladimir P. Lyanzburg
Head of Department JSC «SIC «Polyus»
56v, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 55-46-94
Email: info@polus-tomsk.ru

СООБЩЕНИЯ

УДК: 62.503:303.064:550.47

В.В. Ермаков, В.К. Сарьян

Развитие исследований по применению новых информационных технологий в экологическом мониторинге и биогеохимии

Показаны перспективы интеграции достижений биогеохимии и инфокоммуникационных технологий, в частности интернета вещей. Описывается конкретная разработка, внедрение которой может радикально повысить предсказательный потенциал существующих сегодня систем мониторинга за глобальными процессами. Это приведет к решению актуальной задачи – резкого сокращения материальных и людских потерь при участившемся в мире количестве чрезвычайных ситуаций, вызванных глобальными процессами природного и техногенного происхождения. Описывается создание национального центра мониторинга и проводимые на нем в этом году эксперименты. Предполагается, что использование возможностей IoT позволит ученым получить глобальный экспериментальный полигон для изучения влияния природной среды на динамические характеристики природных объектов, изучить и, возможно, использовать для коррекции природных и техногенных процессов, открывающуюся возможность прямых информационных взаимодействий между собой всех объектов природы в масштабах биосферы. Начатые междисциплинарные исследования и эксперименты будут продолжены.

Ключевые слова: биосфера, техногенез, биогеохимия, мониторинг косных и живых природных объектов, конвергентная инфокоммуникационная среда, интернет вещей, существующие системы мониторинга за глобальными процессами на планете Земля, датчики интернета вещей на основе природных объектов.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-129-134

Основные факторы формирования сильно связанного мира (hyper connected world)

В настоящее время биосфера техногенно трансформируется. Техногенез вносит существенные изменения в среду обитания и оказывает огромное влияние на биоразнообразие. В целом можно выделить следующие стадии состояния биосферы: ее организованность, обусловленную царством организмов, противодействие фактору ее дестабилизации, состояние адаптации, стремление к относительному равновесию (гомеостаз). Изменения в таксонах биосферы сочетаются с изменением O^2/CO_2 , энергии и массы живого вещества [1–3]. При этом техногенез сопровождается как с неблагоприятными для развития организмов факторами, так и с внедрением новых эффективных технологий будущего, составляющих основу и сущность ноосферы.

В последнее время возможность осуществить построение ноосферы по В.И. Вернадскому связывают с впечатляющими успехами развития информационного общества [4–6]. Отметим основные факторы текущего развития информационного общества: формирование единой глобальной конвергентной инфокоммуникационной среды (КИС), в которой в реальном времени взаимодействует уже громадное и все геометрически возрастающее количество объектов: человеко-машинных систем (ЧМС), машинных систем (МС), систем искусственного интеллекта (ИИС), систем машинного обучения (МОС), систем интернета вещей (ИВС). К ним готово присоединиться в очень скором времени и большое количество гуманоидных роботов (ГР). Как показывают прогнозы, в ближайшем будущем все взаимодействующие сегодня в КИС типы объектов – ЧМС, МС, ИИС – преобразуются в ИВС. Обозначим эти трансформированные объекты следующим образом: ИВС_{ЧМС}, ИВС_{МС} и ИВС_{ИИС}. В дальнейшем все

объекты, взаимодействующие в КИС, будем обозначать как ИВС. И очень важно, что при этом природные объекты как бы «приобретают» глобальный голос. В 13-й исследовательской группе сектора стандартизации Международного союза электросвязи (13 SG ИТУ-T) в настоящее время реализуются программы исследований, обозначенных как «Фокус-группа по сетевым аспектам ИМТ-2020» и «Фокус-группа по технологиям для сети 2030 (FG-NET-2030)», участники которых уже предметно заглядывают в будущее, обеспечивая поистине невиданные возможности КИС в ближайшем будущем. На повестке дня – формирование сильно связанного мира. Один из авторов – В.К. Сарьян активно участвует в этой работе.

Это означает, что в глобальное информационное взаимодействие в КИС принципиально могут (т.е. будет технически доступно) вступить все косные и живые (включая человека) объекты природы, принадлежащие к одному виду или стоящие на разных ступенях развития. Аппаратно-программные средства для общения объектов природы сегодня созданы, причем они масштабируются, т.е. они могут подключить к Интернету любой природный объект, преобразованный в ИВС (IoT) (рис. 1), независимо от его размеров и места в иерархическом природном ряду. Кроме того, как видно из приведенной на рис. 1 блок-схемы типового ИВС, он может не только посылать сигналы от своих датчиков в КИС, но и принимать приходящие извне сигналы, в том числе и сигналы управления. Это значит, что новая КИС дает природным объектам, их сообществам такую же возможность взаимодействия, как сообществу людей [2].

Уже сегодня глобальное взаимодействие существенным образом стало влиять на все стороны жизни общества.

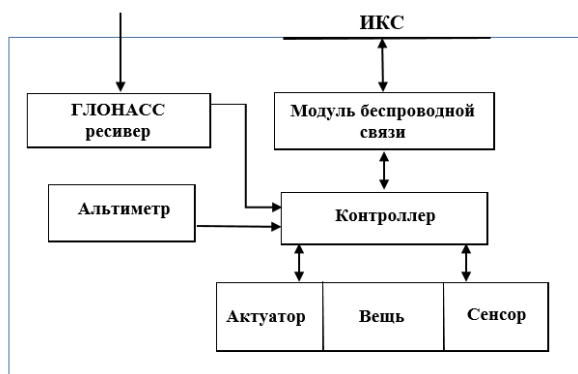


Рис. 1. ИВС [1]

В социальной сфере проявился феномен социальных сетей, новая форма межличностного общения преодолевает расстояния с помощью интернет-технологий. Общества и сообщества людей становятся открытыми для взаимного социокультурного взаимодействия. Неизбежная трансформация КИС в структуру сильно связанного мира не только значительно расширяет возможности взаимодействия, но и позволяет практически решать очень актуальные задачи.

Растущее количество взаимосвязанных глобальных и локальных, природных и социальных, техногенных и экологических, военных и политических, экономических и финансовых катастроф поставило вопрос об их системном научном изучении для выявления структуры стихийных и управляемых факторов и причин предупреждения людских, материальных и финансовых потерь.

По существу, речь идет о научно сконструированном с помощью ИКТ и управляемом процессе обеспечения безопасности жизни в эпоху глобализации и становления ноосферной формы управления [2]. Таким образом, КИС может быть использована для коррекции природных и техногенных процессов. Как видно из вышесказанного, информационная цивилизация стала приобретать практические черты реальности. Если это будет продолжено, то данное направление может ознаменовать новый шаг к практическому построению ноосферы [3–5].

Формирование ноосферы – объективный закон развития природы и общества. Однако в его реализации весьма велика роль субъективного фактора. Поэтому высокое чувство ответственности за состояние окружающей нас природы – одно из важнейших критериев, характеризующих нравственный и интеллектуальный уровень современного человека.

С другой стороны, формирование ноосферы – одна из глобальных задач человечества на современном этапе его развития. Человек – часть природы, и осознание этой истины помогает людям глубже понять их роль и ответственность перед грядущими поколениями за уникальные природные богатства, которые даны в биосфере и которые нужно не только сохранить, но и рационально использовать. К тому же, как было отмечено выше, стремительное развитие ИКТ предоставляет большие возможности для постановки еще недавно казавшейся

дерзкой и утопической задачи практического построения ноосферы.

Среди проблем современной цивилизации первостепенными являются энергетика (и питание), качество окружающей среды и соотношение между биосферными и техногенными процессами. Последние в ряде случаев связаны с природными явлениями: землетрясениями, наводнениями, цунами, вулканизмом, селевыми потоками, оползнями, пожарами и др.

Разработка системы мониторинга землетрясений с повышенным предсказательным потенциалом

Прогнозные технологии землетрясений, несмотря на развитую сеть сейсмических станций в пределах РФ (Северный Кавказ, Камчатка, Алтай и Восточная Сибирь), еще далеки от разрешения – их предсказательный потенциал крайне низок. Именно эту важную и актуальную задачу авторы выбрали в качестве первого шага междисциплинарного сотрудничества. Учитывая возможности КИС, мониторинг землетрясений для радикального повышения предсказательного потенциала в будущем целесообразно совместить в целом с экологическим и геологическим контролем. Было предложено решение использовать возможности ИВС для радикального повышения предсказательного потенциала существующих систем мониторинга землетрясений. Была разработана система гибридного мониторинга, в которой в территориальной близости от существующих пунктов сейсмического контроля располагаются ИВС разных живых (включая человека) и косных природных объектов окружающего мира (рис. 2), которые подключаются к КИС.

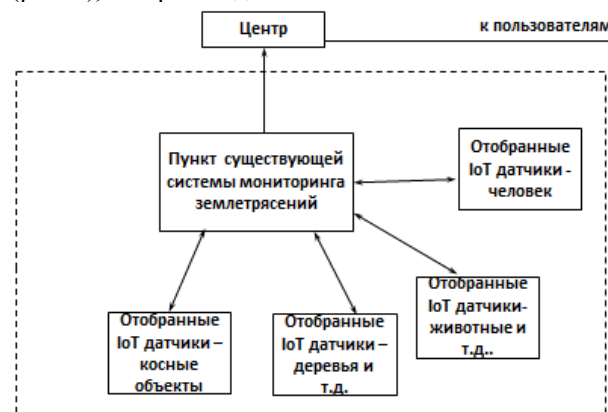


Рис. 2. Фрагмент гибридной системы мониторинга за землетрясениями

Принципиальное значение имеет то обстоятельство, что используемые в качестве датчиков ИВС имели бы отличную от датчиков сейсмических станций физическую природу. Сигналы от этих ИВС-датчиков приходят на ближайший пункт сейсмического контроля и там совместно обрабатываются специально разработанным профессором А.А. Любушиным (ИФЗ РАН) методом синхронизации для выявления слабых сигналов предвестников землетрясений. Ожидается, что это радикально повысит эффективность предсказания катастроф, что в разы

снизит человеческие потери от ЧС. Это решение было утверждено в качестве рекомендации МСЭ-Т, и проводится семинар, научным руководителем которого является В.К. Сарьян, а докладчиком – В.В. Ермаков.

Здесь улучшение результатов прогноза землетрясений осуществляется на основании, например:

- регистрации слабых повторяющихся толчков (форшоков),
- изменений параметров геофизических полей (магнитных, электрических, гравитационных и др.),
- сигналов деформации земной поверхности,
- изменения гидрогеохимических параметров среды;
- изменений в характере поведения животных и растений.

В дальнейшем целесообразно переходить от качественных признаков поведения косных и живых природных объектов (включая человека), используемых в качестве ИВС-датчиков в гибридной системе мониторинга, к количественным критериям на основании таких параметров, как газовый состав, содержание ртути, селена и других химических элементов, проводимость, мутность и т.д., для косных объектов; пульсация, сердечный ритм, температура, мышечное напряжение, состав крови, уровень гормонов и т.д. – для живых. Предполагается, что мониторинг в реальном масштабе времени и исследование корреляции динамических характеристик параметров природных объектов с показаниями сейсмических датчиков еще больше повысит предсказательную чувствительность создаваемых гибридных систем мониторинга. Но это требует значительных научных исследований и технических решений, которые предполагается развернуть на создаваемом национальном полигоне, о котором будет сказано ниже.

Создание мощной доступной мировому научному сообществу экспериментальной базы

Переходя от мониторинга землетрясений и других природно-техногенных катастроф к экологическим проблемам, следует особо подчеркнуть острую необходимость развития биологических и экологических исследований.

Эффективность биогеохимического мониторинга экосистем зависит от методов исследований. Если в конце XX в. в основном применяли статические методы, то в настоящее время процессы, происходящие в экосистемах, начинают оценивать посредством динамических методов. Это и космический скрининг территорий, и различные способы использования интернета вещей (ИВ). Последние позволяют решить проблемы комплексного динамического мониторинга территорий, что отражается на экономии энергии, эффективности использования агроландшафтов, повышении продуктивности сельскохозяйственных культур и качества продуктов питания и кормов.

В настоящее время в связи с техногенным преобразованием таксонов биосферы, развитием цифровых технологий и отслеживанием природно-техногенных процессов в динамике и использованием сети интернета вещей для создания глобальной

экспериментальной базы необходима реализация следующих задач:

- в области экологического и биогеохимического мониторинга перспективно отслеживание специальными датчиками циклов воды в биосфере, баланса расхода и прихода воды;
- контролирование изменений газового состава атмосферы (CO_2 , CH_4 и N_2), что позволит определять газовый баланс и осуществлять прогнозные оценки изменений в биосфере;
- разработка и использование специальных датчиков контроля проявления и течения микроэлементов (дефицит Se, J). Измерение концентраций йода и селена может измеряться в атмосферном воздухе при оценке экологического статуса микроэлементов – сердечно-сосудистых и эндокринных патологий;
- отслеживание изменения электропроводности воды, pH, мутности для предсказания селей, оползней и лавин в горных районах;
- апробация специальных датчиков цветности ландшафтов при оценке биопродуктивности ландшафтов и фитобиоразнообразия;
- оценка использования физиологических датчиков для изучения реакций животных на неблагоприятные экологические и биогеохимические факторы;
- совершенствование и апробация специальных датчиков измерения потоков элементной ртути и радона в шахтных резервуарах;
- исследование механохимических и биохимических взаимодействий в системе косное тело–организм–косное тело.

Мониторинг биогеохимических параметров может осуществляться на различном временном уровне: непрерывное измерение параметров, дискретное измерение параметров (через час, сутки, месяц, год), используя систему существующих датчиков и сенсоров:

- портативная система мониторинга показателей почвы Stevens Hydra Probe Field Portable,
- датчик углекислого газа VAISALA GMT220,
- индикатор радона – RADEX MR107,
- анализатор ртути УКР-1МЦ,
- датчик ртути 3000 IP, переносной газоанализатор паров ртути в воздухе и прочих газов,
- датчик ОБП (Redox) – окислительно-восстановительный потенциал pH S406 DG,
- цифровой оптический датчик кислорода S423/C/OPT,
- датчик (электрод) мутности цифровой S461/T,
- амперометрический датчик свободного хлора с мембраной S494/2/CL2,
- контроллер pH или Redox и температуры, СЕРИЯ 4238,
- датчик pH S401 V/G,
- датчик проводимости S411/C/0.5 термокомпенсированный,
- кондуктивный датчик проводимости S411S,
- контроллер проводимости и температуры, СЕРИЯ 3523,
- датчики мутности Turbimax CUS52D,
- датчик мутности и определения содержания взвешенных веществ,

- система измерения мутности 4670,
- интеллектуальный анализатор с двумя входами,
- датчик электропроводности 4905,
- датчики электропроводности жидкости ДЭИ-3290-01, ДЭИ-3290-02, ДЭИ-3290-01А, ДЭИ-3290-02А и др.

Следует заметить, что датчиков по изменению элементного состава большинства химических элементов практически сегодня нет. Учитывая высокую потребность в этих аппаратах, проводится разработка таких устройств и технологий их применения.

Очень важный вопрос – «сшивание» знаний. Метод совместной обработки сейсмических сигналов и сигналов от датчиков ИВС как раз иллюстрирует одни из возможных методов «сшивания» знаний – сигналов сейсмических датчиков и синхронных изменений параметров процессов в ИВС, которые связаны готовящимися процессами землетрясения. Далее описываются работы, которые были предприняты междисциплинарным коллективом из сотрудников ГЕОХИ РАН и ФГУП НИИР.

Создание полевого национального центра

Территориально полевой национальный центр комплексных эколого-биогеохимических исследований решено было организовать на геологической базе МГУ им. М.В. Ломоносова имени профессора А.П. Соловова в пос. Н. Унал Северной Осетии. Она была создана в 1988 г. для практики студентов и работ аспирантов геологического факультета МГУ. Основателем геологической базы МГУ был профессор геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Александр Петрович Соловов – известный в России и за рубежом геохимик, автор одного из первых курсов «Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых».

База расположена в высокогорном районе на высоте 900 м н.у. моря в отрогах Скалистого хребта. В бассейне горных рек Северной Осетии нередки снежные лавины, сход ледников, оползни, сели, землетрясения и наводнения. В настоящее время база используется для работ местных геологов, контролирующих селевые процессы, процессы таяния ледников, уровень воды в горных реках и др.

Помещение базы включает 5 комнат площадью 36 м², 5 аудиторий площадью 200 м², подвальное помещение для камеральных работ, земельный участок с садом, баней и другими постройками, включая столовую. Кроме того, в помещении базы имеется просторная веранда. Помещения отапливаются в холодный сезон. На базу подведен электрический ток и вода из горных источников. На базе возможна установка специального оборудования, включая аналитические и другие приборы. База находится на балансе геологического факультета МГУ, зав. базой – Вячеслав Аксарович Бугулиев.

Приборная база этой станции в настоящее время начала активно модернизироваться. Приобретаются современные приборы для изучения потоков тепла, оценки параметров гидросферы и атмосферы, включая изучение углекислотного баланса экосистем, метеорологические, сейсмические и климатологические приборы.

Полевые и лабораторные исследования, выполненные в 2018 г.

Полевые и лабораторные исследования проведены на геологической базе МГУ им. М.В. Ломоносова в июле 2018 г., а затем – в лаборатории биогеохимии окружающей среды ГЕОХИ РАН. Они позволили выявить градиент концентрации металлов (Pb, Zn, Cu, Cd) в почвенно-растительном комплексе и провести статические биогеохимические и экологические исследования. Далее будет изучаться корреляция этих данных с данными сейсмической активности, полученными с близкорасположенных пунктов сейсмического мониторинга. Используя новые методы биогеохимической индикации и геохимической экологии, выявлены специфические реакции растительных и животных организмов на изменение уровня содержания тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu, Zn и др.).

Установлено преобладающее загрязнение ландшафтов поймы р. Ардон свинцом и мышьяком. Обнаружена высокая положительная корреляция между суммой металлов в почвах и укосов растений ($r = +0,998$). На техногенных участках снижается число обитаемых видов растений, биомасса укосов и фитопокров. Выявлен новый вид – металлофит *Cladochaeta candidissima* (M. Vieb.) DC – кладохета чистейшая. Общее содержание SH-соединений и аминокислот в корневой части растений было больше, чем в листьях. В опытах *in vitro* при внесении хлорида кадмия и восстановленного глутатиона было установлено присутствие фитохелатинов за счет уменьшения концентрации глутатиона.

Проведена оценка флуктуирующей асимметрии листьев белой березы (*Betula alba*) в ландшафтах с различной техногенной нагрузкой. Указанные реакции организмов во многом определяются физико-химическими свойствами почв, климатическими, биологическими и техногенными факторами. При их дальнейшей оценке необходима связь с основным продуктом метаболизма организмов – балансом углекислого газа. Поэтому дальнейшие исследования целесообразно проводить с учетом этого фактора, а также с одновременной динамической оценкой изменения цветности ландшафтов, используя для этих целей специальные датчики CO₂ и оптические сенсоры.

Повышенный уровень свинца и мышьяка в почвах и растениях поймы р. Ардон сопровождается увеличением их концентраций в крови и волосах животных и может рассматриваться как фактор риска относительно их неблагоприятного влияния на физиологические процессы в организме обследуемых животных.

(В работе на полигоне принимали участие сотрудники ГЕОХИ РАН: проф., д.б.н. В.В. Ермаков; г.н.с., д.б.н. С.Ф. Тютиков; г.н.с., д.б.н. В.А. Сафонов; н.с. В.Н. Данилова; аспирант У.А. Гуляева).

Заключение

Результаты выполненной работы могут дать ценную информацию о динамике эколого-биогеохимических процессов в одном из горных субрегионов биосферы и реакциях организмов на различные проявления природных катастроф. Использование по-

лученных данных в мониторинге микроэлементов позволит получить достоверную и объективную информацию об экологическом состоянии территории, особенностях химического элементного состава организмов и среды их обитания и отслеживать динамику изменения различных параметров.

Совершенствование динамической модели эколого-биогеохимических исследований с использованием IoT-технологий – качественно новая стратегия при исследованиях воздействий, вызванных различными процессами данной экосистемы.

Полученные результаты исследований могут быть использованы не только для совершенствования научной методологии, но и в профилактической медицине, экологии, эпидемиологии и народном хозяйстве.

В работе участвуют аспиранты и молодые сотрудники лабораторий заинтересованных институтов. Предполагается организация совместных научных симпозиумов, конференций и выпуск монографии по современным эколого-биогеохимическим и IoT-инновациям. Возможно сотрудничество с научными коллективами других государств (КНР, Сербии, Казахстана, Киргизии, Японии и других стран).

Как полагает один из авторов В.К. Сарьян, ближайшая задача науки и техники – вывести на свет информационную составляющую биогеохимических объектов в интернет, научиться управлять процессами взаимодействия и снизить вредное влияние антропогенеза. То есть создать искусственный локальный или даже глобальный механизм адаптации и коррекции неблагоприятных биосферных процессов.

Предполагается, что использование возможностей интернета вещей позволит ученым получить мировую экспериментальную площадку по изучению влияния окружающей среды на динамические характеристики природных объектов, а результаты исследований могут быть использованы для изучения природных и антропогенных процессов, открывая возможность прямого информационного взаимодействия между всеми объектами природы в масштабах биосферы и ближайшего космического окружения.

В целом КТ наряду с биогеохимическими будут способствовать уменьшению выбросов CO₂ в атмосферу, оздоровлению окружающей среды и эффективному и оперативному обмену информацией.

Авторы предполагают продолжить публикации по этой тематике в «Трудах ТУСУРа» в дальнейшем, в том числе и с целью привлечь внимание читателей журнала к этой актуальной научной и практической проблеме.

Литература

1. Сарьян В.К. На пути интеграции наук о Земле и интернета вещей // Общее собрание НАН РА. Отделение физики и астрофизики, Ереван, 12 апреля 2016 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://niir.ru/news/otkrytye-dannye/doklady-i-prezentacii-fgur-niir/>, свободный (дата обращения: 17.09.2018).

2. Сарьян В.К. Возможность создания мощной экспериментальной базы для биогеохимических исследований //

Современные проблемы состояния и эволюции таксонов биосферы: труды биогеохимической лаборатории. – М.: ГЕОХИ РАН, 2017. – Т. 26. – 495 с.

3. Sarian V. Internet of Things technology – a powerful catalyst functioning single digital space. Presentations from the ITU Regional Workshop on IoT and Future Networks, Saint Petersburg, Russia, 19–20 June 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Pages/EVENTS/2017/06_Saint_Petersburg/06_SPB_Presentations.aspx, свободный (дата обращения: 17.09.2018).

4. Biogeochemical Differentiation of Living Matter and Biodiversity in the Ardon Polymetallic Subregion of the Biosphere / V.V. Ermakov, S.F. Tyutikov, A.P. Degtyarev, V.A. Safonov, V.N. Danilova, S.D. Khushvaktova, U.A. Gulyaeva, E.V. Krechetova // *Geochemistry International*. – 2018. – Vol. 56, No. 4. – P. 318–331. DOI <https://doi.org/10.1134/S001670291804002X>

5. Ecological–Biogeochemical Monitoring of a Linden Avenue in a Megapolis / S.F. Tyutikov, S.D. Khushvaktova, V.N. Danilova, V.V. Ermakov // *Geochem. Int.*, 2018. – Vol. 56, no. 5. – P. 488–493. <https://doi.org/10.1134/S0016702918050087>

6. The relationship of the mobility of Ca and Sr in soils to their content in meadow plants / V. Ermakov, J. Bech, U. Gulyaeva, V. Safonov, S. Tyutikov, N. Roca. // *Geophysical Research Abstracts*. EGU General Assembly. – 2018. – Vol. 20. – EGU2018-3141 – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/posters/26787>, свободный (дата обращения: 17.09.2018).

7. Ermakov V. Nowadays development of biogeochemical methods as an approach towards integrated knowledge system by use of modern information and communication technologies / V. Ermakov, V. Saryan // *Challenges of Green Economy*. – Beograd: University «Union-Nikola Tesla», 2018. – P. 57–76 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/323414396>, свободный (дата обращения: 17.09.2018).

8. Sarian V. Development of methodology of sciences the environment and organisms about / V. Sarian, V. Ermakov, L. Jovanovic // *International Scientific Conference on Green Economy and Environment Protection*, Beograd, 23–25 April, 2018. Abstracts. – Beograd: Zemun: Akademska izdanja, 2018. – P. 83.

9. Creating a hybrid monitoring network of global processes of natural and man-made disasters on the planet Earth, using geo-technologies of the Internet of things (GeoIoT) / V.K. Sarian, A.P. Nazarenko, A.A. Lyubushin // *First Forum GeO IoT World 2016*, Brussels, Belgium, 25 may 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://niir.ru/wp-content/uploads/2013/12/NIIR_Viliam-Sarian.pdf, свободный (дата обращения: 17.09.2018).

10. Recommendation ITU-T 2018 – Y.4121 «Requirements of an Internet of Things enabled network for support of applications for global processes of the Earth» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=13636&lang=en>, свободный (дата обращения: 17.09.2018).

11. Earthquakes and Waterfloods Monitoring System with the Application of the Internet of Things (IoT). Workshop on APEC TEL58 Taipei. Chinese Taipei. 1 October 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.apec-erwg.org/public/uploadfile/act/16bed26f89ad133a998a79813e0c4bd4.pdf>, свободный (дата обращения: 17.09.2018).

Ермаков Вадим Викторович

Д-р биол. наук, проф., зав. лаб. ГЕОХИ РАН,
заслуженный деятель науки РФ
Косыгина ул., д. 19, г. Москва, Россия, 119334
Тел.: +7-916-189-80-29
Эл. почта: vad-ermak@yandex.ru

Сарьян Вильям Карпович

Академик НАН РА, д-р техн. наук, проф.,
научный консультант ФГУП НИИР,
заслуженный работник связи РФ
Казакова ул., д. 16, г. Москва, Россия, 105064
Тел.: +7-916-134-61-37
Эл. почта: sarian@niir.ru

Ermakov V.V., Sarian V.K.

Development of research on the application of new information technologies in the environmental monitoring and biogeochemistry

The prospects of integrating the achievements of biogeochemistry and infocommunication technologies, in particular the Internet of things, are shown. In particular, a specific development is described, which implementation could drastically increase the predictive potential of today's monitoring systems for global processes. This will lead to the solution of the actual task – a sharp reduction in material and human losses with the increasing number of emergency situations caused by global natural and man-made processes. The creation of a national monitoring center and the experiments conducted on it this year are described. It is assumed that the use of IoT capabilities will allow scientists: to obtain a global experimental range for studying the influence of the natural environment on the dynamic characteristics of natural objects and to study and, possibly, to correct natural and man-made processes, the possibility of direct information interactions among themselves of all objects of nature in the scale of the biosphere. The interdisciplinary research and experiment will be continued.

Keywords: biosphere, technogenesis, biogeochemistry, monitoring of inert and living natural objects, convergent infocommunication environment, Internet of things, existing monitoring systems for global processes on the Earth, sensors of the Internet of things on the basis of natural objects.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-129-134

References

1. Saryan V.K. On the Way of Integration of Earth Sciences and the Internet of Things // The General Assembly of NAS RA. Department of Physics and Astrophysics, Yerevan, April 12, 2016 [Electron resource]. Access mode: <https://niir.ru/news/ot-krytye-dannye/doklady-i-prezentacii-fgup-niir/>, free (accessed: 17.09.2018) (In Russ.).

2. Saryan V.K. The possibility of creating a powerful experimental base for biogeochemical research. the works of the biogeochemical laboratory // Modern problems of the state and evolution of biosphere taxons. M.: GEOKHI RAS, 2017, vol. 26, 495 p. (In Russ.).

3. Sarian V. Internet of Things technology – a powerful catalyst functioning single digital space. Presentations from the ITU Regional Workshop on IoT and Future Networks, Saint Petersburg, Russia, 19–20 June 2017 [Electron resource]. Access mode: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Pages/EVENTS/2017/06_Saint_Petersburg/06_SPB_Presentations.aspx, free (accessed: 17.09.2018).

4. Biogeochemical Differentiation of Living Matter and Biodiversity in the Ardon Polymetallic Subregion of the Biosphere / V.V. Ermakov, S.F. Tyutikov, A.P. Degtyarev, V.A. Sa-

fonov, V.N. Danilova, S.D. Khushvakhtova, U.A. Gulyaeva, E.V. Krechetova // *Geochemistry International*, 2018. Vol. 56, no. 4, pp. 318–331. doi: <https://doi.org/10.1134/S001670291804002X>

5. Ecological–Biogeochemical Monitoring of a Linden Avenue in a Megapolis / S.F. Tyutikov, S.D. Khushvakhtova, V.N. Danilova, V.V. Ermakov // *Geochem. Int.*, 2018, vol. 56, no. 5, pp. 488–493. <https://doi.org/10.1134/S0016702918050087>

6. The relationship of the mobility of Ca and Sr in soils to their content in meadow plants / V. Ermakov, J. Bech, U. Gulyaeva, V. Safonov, S. Tyutikov, N. Roca // *Geophysical Research Abstracts*. EGU General Assembly, 2018, vol. 20-EGU2018-3141 [Electron resource]. Access mode: <https://meetingor-ganizer.copernicus.org/EGU2018/posters/26787>, free (accessed: 17.09.2018).

7. Ermakov V. Nowadays development of biogeochemical methods as an approach towards integrated knowledge system by use of modern information and communication technologies / V. Ermakov, V Saryan. // *Challenges of Green Economy*, Beograd: University «Union-Nikola Tesla», 2018, pp. 57–76 [Electron resource]. Access mode: <https://www.researchgate.net/publication/323414396>, free (accessed: 17.09.2018).

8. Sarian V. Development of methodology of sciences the environment and organisms about / V. Sarian, V. Ermakov, L. Jovanovic. // *International Scientific Conference on Green Economy and Environment Protection*, Beograd, 23–25 April, 2018. Abstracts, Beograd: Zemun: Akademska izdania, 2018, P. 83.

9. Creating a hybrid monitoring network of global processes of natural and man-made disasters on the planet Earth, using geo-technologies of the Internet of things (GeoIoT) / V.K. Sarian, A.P. Nazarenko, A.A. Lyubushin // *First Forum GeO IoT World 2016*, Brussels. Belgium. 25 may 2016. — [Electron resource]. Access mode: https://niir.ru/wp-content/uploads/2013/12/NIIR_Viliam-Sarian.pdf, free (accessed: 17.09.2018).

10. Recommendation ITU-T 2018 – Y.4121 «Requirements of an Internet of Things enabled network for support of applications for global processes of the Earth». [Electron resource]. Access mode: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=13636&lang=en>, free (accessed: 17.09.2018).

11. Earthquakes and Waterfloods Monitoring System with the Application of the Internet of Things (IoT). Workshop on APEC TEL58 Taipei. Chinese Taipei. 1 October 2018 [Electron resource]. Access mode: <https://www.apec-epwg.org/public/uploadfile/act/16bed26f89ad133a998a79813e0c4bd4.pdf>, free (accessed: 17.09.2018).

Vadim V/ Ermakov

Doctor of Biological Sciences, professor,
Head of Laboratory GEOCHI RAS,
Honored Worker of Science of the Russian Federation
19, Kosygin str., Moscow, Russia, 119334
Phone: +7-916-189-80-29
Email: vad-ermak@yandex.ru

Viliam K. Sarian

Academician of NAS RA, Doctor of Engineering Sciences,
professor, Scientific Consultant FSUE NIIR,
Honored Communications Worker of the Russian Federation
16, Kazakov str., Moscow, Russia, 105064
Phone: +7-916-13-46-137
Email: sarian@niir.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. 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. 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 ; β_2 ; H_2O , Adobe Acrobat, Cisco и т.д.); векторные величины – жирным, прямо (не курсив) – A_1 , $M(f)$, β_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 – также 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, 414-ГК.

Эл. почта: vnmas@tusur.ru. Тел.: +7 (382-2) 51-21-21

