

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Доклады ТУСУР. 2018 • Том 21, № 4

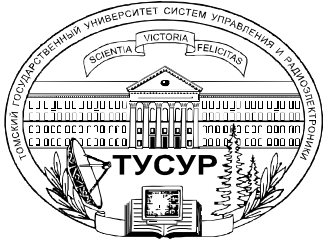
ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

2018 • Том 21, № 4



9 771818 044708 02007



Министерство образования и науки Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
2018, том 21, № 4**

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, почетный работник ВПО РФ, Томск, Россия.

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

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

А.М. Кориков, д.т.н., проф., зав. каф. автоматизированных систем управления, ТУСУР, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник науки и техники РФ, почетный 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, почетный работник ВПО РФ, почетный 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 25.12.2018.

Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 11,4. Тираж 500. Заказ 38.

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, Director of the Research Institute of Automation and Electromechanics (SRI AEM) TUSUR, Candidate of Engineering.
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, National Research University of Electronic Technology (MIET, Moscow), Doctor of Engineering, Professor.
Yury P. Ekhlakov	Head of the Department of Data Processing Automation, 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, 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), Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering, Professor
Yefim M. Oks	Head of the Department of Physics, 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, 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, TUSUR University, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
Yury A. Shurygin	First Vice-Rector of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.

Содержание

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Фисанов В.В.	
Волновые параметры изотропной киральной среды с потерями	7
Семенов Э.В., Малаховский О.Ю.	
Измерение больших значений добротности емкостных объектов прямым методом с использованием специальной калибровки измерителя импеданса	11
Троян П.Е., Зеленский В.И., Каранский В.В.	
Импульсные характеристики наноструктур металл–диэлектрик–металл	17
Филатов А.В.	
Модель входного устройства радиометрического приемника для измерения профиля глубинных температур биологических сред методом неинвазивной радиотермометрии	21
Иштуткин С.В., Арыков В.С., Жидик Ю.С., Троян П.Е.	
Плазмохимическое травление InP/InGaAs гетероструктуры в индуктивно связанной плазме Cl ₂ /Ar/N ₂ для формирования оптических волноводных структур	28

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Ложников П.С., Жумажанова С.С.	
Об угрозах безопасности сведений ограниченного доступа в системах смешанного документооборота и правовом регулировании в области применения цифровых подписей с биометрической активацией	35
Исхаков С.Ю., Исхаков А.Ю., Шелупанов А.А.	
Алгоритм применения краткосрочного прогнозирования для выявления инцидентов информационной безопасности посредством анализа сетевого трафика	44
Голдобина А.С., Исаева Ю.А., Селифанов В.В., Климова А.М., Зенкин П.С.	
Построение адаптивной трехуровневой модели процессов управления системой защиты информации объектов критической информационной инфраструктуры	51-58
Кожевников А.А.	
Мультифункциональные арифметические устройства в остаточных классах	59
Разумников С.В.	
Некомпенсаторное агрегирование и рейтингование провайдеров облачных услуг	63
Густокашин П.Е., Катаев М.Ю.	
Сравнительный анализ аэрозольной оптической толщи из спутниковых продуктов MODIS и CALIPSO уровня L2	70
Катаев М.Ю., Ёлгин К.С., Сорокин И.Б.	
Методы технического зрения для картирования состояния сельскохозяйственных полей	75
Силич М.П., Аксенов С.В.	
Генерация наименований нечетких кластеров в пространстве разнородных признаков для зонирования территориальных объектов по внешним условиям	81
Паращинец А.В., Ефремова А.Е.	
Нейросетевой алгоритм кластеризации узлов беспроводной сенсорной сети на основе самоорганизующейся карты Кохонена	87
Кориков А.М., Мещеряков Я.Е.	
Ориентация горных технологических машин на основе микроэлектромеханических систем	92
Любченко А.А., Копытов Е.Ю., Богданов А.А.	
Статистическое моделирование качественных показателей эксплуатации и технического обслуживания средств железнодорожной электросвязи в среде AnyLogic	98
Сергеев В.Л., Нгуен Т.Х.Ф., Ву К.Д.	
Модели и алгоритмы идентификации начального участка забойного давления в адаптивном методе детерминированных моментов давлений	109

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Фролова В.П., Прокопенко Н.А., Кизириди П.П.	
Генерация ионных пучков в вакуумном дуговом ионном источнике с двухкомпонентным катодом	119
Малышенко А.М., Майков С.А.	
Методика определения относительных энергозатрат привода раскрытия рефлектора антенны зонтичного типа при наземных его испытаниях на стенде с активной системой обезвешивания	123
Требования	130

Contents
ELECTRONICS, MEASUREMENT TECHNOLOGY, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Fisanov V.V. Wave parameters of an isotropic chiral medium with losses	7
Semyonov E.V., Malakhovskij O.Yu. Measurement of High-Values Quality Factor of Capacitive Objects by the Direct Method Using a Special Calibration of Impedance Meter	11
Troyan P.E., Zelensky V.I., Karansky V.V. Impulse characteristics nanostructures of metal-dielectric-metal	17
Filatov A.V. Model of the input device of the radiometric receiver for measuring the profile of the deep temperatures of biological media by non-invasive radio thermometry	21
Ishutkin S.V., Arykov V.S., Zhidik Y.S., Troyan P.E. Inductively coupled plasma etching of InP/InGaAs heterostructure for optical waveguide structures.....	28

CONTROL, COMPUTER SCIENCE, AND INFORMATICS

Lozhnikov P.S., Zhumazhanova S.S. On threats to the security of restricted information in mixed document flow and legal regulation in the application of digital signatures with biometric activation	35
Iskhakov S.Y., Iskhakov A.Y., Shelupanov A.A. Algorithm for applying short-term forecasting to detect information security incidents through the network traffic analysis	44
Goldobina A.S., Isaeva Yu.A., Selifanov V.V., Klimova A.M., Zenkin P.S. Building an adaptive three-tier model of management processes for the information security system of critical information infrastructure objects.....	51
Kozhevnikov A.A. Multifunctional arithmetic devices in residual classes	59
Razumnikov S.V. Noncompensatory aggregation and rating of cloud service providers.....	63
Gustokashin P.E., Kataev M.Yu. Comparative analysis of aerosol optical thickness from MODIS and CALIPSO L2 satellite products	70
Kataev M.Yu., Elgin K.S., Sorokin I.B. Computer vision methods for mapping the state of agricultural fields	75
Silich M.P., Axyonov S.V. Generation of names of fuzzy clusters in the space of heterogeneous features to zone of territories by external conditions.....	81
Parashchinec A.V., Efremova A.E. Neural network algorithm for clustering wireless sensor network nodes based on Kohonen self-organizing maps	87
Korikov A.M., Meshcheryakov Y.E. Orientation of mining technology machines based on microelectromechanical systems	92
Lyubchenko A.A., Kopytov E.Y., Bogdanov A.A. Statistical modeling of quality measures of operation and preventive maintenance of railway telecommunication equipment in AnyLogic.....	98
Sergeev V.L., Nguyen T.H.P., Vu Q.D. Models and algorithms for identification of oil and gas reservoirs by the adaptive method of deterministic pressure moments	109

ELECTRICAL ENGINEERING

Frolova V.P., Prokopenko N.A., Kiziridi P.P. Generation of ion beams in a vacuum arc ion source with a two-component cathode	119
Malyshenko A.M., Majkov S.A. Methodology of relative energy usage evaluation for an opening drive of umbrella-type reflector antenna at ground tests on active gravity compensation system.....	123
Manuscript requirements	130

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

УДК 537.876.22

В.В. Фисанов

Волновые параметры изотропной киральной среды с потерями

Рассматриваются плоские электромагнитные волны в изотропной поглощающей киральной среде (киральном метаматериале). Применяется система материальных уравнений Теллегена с комплексными значениями диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости и параметра киральности. Проводится различие между прямыми и обратными эванесцентными нормальными волнами левой и правой круговых поляризаций посредством введения специального параметра – идентификатора типа волны. Представлены аналитические выражения для действительных и мнимых частей волновых чисел и волнового сопротивления однородных нормальных волн.

Ключевые слова: изотропная киральная среда, метаматериал, диссипативные потери, комплексные материальные параметры, прямые нормальные волны, обратные нормальные волны, идентификатор типа волны, волновое число, волновое сопротивление.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-7-10

Термин «киральная среда» в прикладной электродинамике появился в последней четверти XX столетия [1] и вскоре получил широкую известность в связи с проблемой создания радиопоглощающих материалов с улучшенными свойствами [2–4]. Киральная среда первоначально определялась как композитная электромагнитная среда СВЧ-диапазона, состоящая из макроскопических киральных объектов (например, проволочных спиралей), беспорядочно распределённых во вмещающем диэлектрике. Впоследствии интерес исследователей распространился на терагерцовые и оптические киральные метаматериалы с преимущественно периодическим пространственным распределением включений – киральных метаатомов.

Распространение электромагнитных волн в киральных материалах, как и в естественных оптически активных средах, изучается в рамках концепции сплошной среды с эффективными значениями материальных параметров. Киральная среда характеризуется не только диэлектрической и магнитной проницаемостями, но и дополнительным параметром киральности. Соотношения связи между материальными и волновыми параметрами нормальных волн в среде являются основополагающими при рассмотрении различных задач прикладной электродинамики. В прозрачных изотропных метакиральных средах существуют прямые и обратные нормальные волны двух круговых поляризаций, различающиеся противоположными направлениями распространения фазового фронта при едином направлении потока энергии. Для их разграничения был введён дополнительный параметр – идентификатор типа волны [5].

Применительно к реальным поглощающим киральным средам, обладающим также явлением кругового дихроизма, характеристики нормальных волн изучены недостаточно. Хотя в поглощающей среде все три материальных параметра являются комплексными величинами, мнимую часть параметра киральности порой игнорируют. Более того, отсутствует соглашение относительно знака мнимой час-

ти параметра киральности. Её принимают положительной [6–8], но допускаются и отрицательные значения [9, 10].

В данном сообщении, как и в [5], для описания киральной среды используются материальные уравнения Теллегена, наиболее часто применяемые в случае киральных метаматериалов. Волновые числа нормальных волн в этом случае являются суммарной и разностной комбинациями волнового числа в некиральной среде и линейной киральной добавки. Это обстоятельство позволяет использовать при аналитическом продолжении в область комплексных значений волновых параметров результаты статьи [11].

Симметричные материальные уравнения для изотропной киральной среды в EH -представлении имеют вид

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} - g \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + g \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (1)$$

где применены обозначения: \mathbf{E} , \mathbf{H} – напряжённости электрического и магнитного полей; \mathbf{D} , \mathbf{B} – их индукции; ε – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; g – коэффициент гирации среды, пропорциональный плотности киральных «метаатомов» [12, 13]. Для монохроматического поля с круговой частотой ω и временным фактором $\exp(-i\omega t)$ система материальных уравнений (1) преобразуется к виду

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} + ik \mathbf{H}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} - ik \mathbf{E} \quad (2)$$

(известному как формализм Теллегена), где теперь $k = \omega g$ – параметр киральности. (Иногда пользуются безразмерным параметром киральности $\tilde{k} = ck$, где c – скорость света в пустоте.) В прозрачной среде все материальные параметры являются действительными числами. Идеальные среды с общими значениями проницаемостей, различающиеся только по знаку параметра киральности k , образуют пары зеркальных энантиомеров. Обычно принимают, что $k > 0$ в прозрачных средах и $\text{Re}(k) = k_r > 0$ в поглощающих средах. Кроме того, при выбранном варианте временной зависимости мнимые части эффек-

тивных проницаемостей будут положительными: $\text{Im}(\varepsilon) = \varepsilon_i > 0$, $\text{Im}(\mu) = \mu_i > 0$. С учётом (2) из вихревых уравнений Максвелла

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega(\mu \mathbf{H} - i\kappa \mathbf{E}), \quad \nabla \times \mathbf{H} = -i\omega(\varepsilon \mathbf{E} + i\kappa \mathbf{H}) \quad (3)$$

следуют также дивергентные соотношения $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ и $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ при условии, что $\varepsilon \mu - \kappa^2 \neq 0$.

Для плоской однородной волны с пространственным фактором $\exp(i\boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{r})$, где $\boldsymbol{\gamma}$ – волновой вектор, \mathbf{r} – радиус-вектор, $i = \sqrt{-1}$, дифференциальные уравнения (3) переходят в линейные алгебраические уравнения для векторных амплитуд

$$\boldsymbol{\gamma} \times \mathbf{E} = \omega(\mu \mathbf{H} - i\kappa \mathbf{E}), \quad \boldsymbol{\gamma} \times \mathbf{H} = -\omega(\varepsilon \mathbf{E} + i\kappa \mathbf{H}), \quad (4)$$

а также $\boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{E} = 0$ и $\boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{H} = 0$. Векторное умножение уравнений (4) на вектор $\boldsymbol{\gamma}$ с последующим вычислением двойных векторных произведений приводит к системе линейных уравнений:

$$\begin{cases} \left[\gamma^2 - \omega^2(\varepsilon \mu + \kappa^2) \right] \mathbf{E} + i2\omega^2 \mu \kappa \mathbf{H} = 0, \\ i2\omega^2 \varepsilon \kappa \mathbf{E} + \left[\gamma^2 - \omega^2(\varepsilon \mu + \kappa^2) \right] \mathbf{H} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

из условия существования нетривиального решения которой выводится дисперсионное соотношение

$$\left[\gamma^2 - \omega^2(\varepsilon \mu + \kappa^2) \right]^2 - 4\omega^4 \varepsilon \mu \kappa^2 = 0 \quad (6)$$

относительно волновых чисел $\gamma = \gamma_1$ и $\gamma = \gamma_2$, которыми характеризуются две нормальные волны однородной киральной среды. Волновые числа и волновые векторы соотносятся как $\gamma_{1,2} = \gamma_{1,2} \hat{\boldsymbol{\gamma}}$, где $\hat{\boldsymbol{\gamma}}$ – единичный вектор направления распространения волнового фазового фронта. В прозрачной среде волновые числа $\gamma_{1,2} = |\gamma_{1,2}|$ являются положительными величинами. При наличии поглощения рассматриваем однородные эванесцентные нормальные волны; действительная $\text{Re}(\gamma)$ и мнимая $\text{Im}(\gamma)$ части волнового вектора такой волны являются параллельными направляющему орту $\hat{\boldsymbol{\gamma}}$, а $\text{Re}(\gamma) = \gamma_r > 0$.

По этой причине следует принимать во внимание только два корня биквадратного уравнения (6), которое приводится к виду

$$(\gamma^2 - \tilde{\gamma}_1^2)(\gamma^2 - \tilde{\gamma}_2^2) = 0,$$

где $\tilde{\gamma}_{1,2} = k \pm \omega \kappa$, $k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$. Среди нулей этого уравнения, отвечающих двум парам встречных нормальных волн, в качестве волновых чисел выбираются два значения

$$\gamma_j = \tilde{\gamma}_j \text{sgn}(\text{Re} \tilde{\gamma}_j) = |\text{Re} \tilde{\gamma}_j| + i \text{Im}(\tilde{\gamma}_j) \text{sgn}(\text{Re} \tilde{\gamma}_j), \quad (7)$$

(индекс $j = 1$ или 2), $\text{sgn}(\cdot)$ – знаковая функция.

Волновое число некиральной среды $k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$ является предельным значением для чисел γ_1 и γ_2 , равно как и волновой вектор $\mathbf{k} = k \hat{\boldsymbol{\gamma}} = k \hat{\boldsymbol{\gamma}}$ является предельным для векторов $\boldsymbol{\gamma}_1$ и $\boldsymbol{\gamma}_2$, если параметр ки-

ральности к приравнять нулю, причём $\text{Re} k \geq 0$, а $\text{Im} k > 0$ (для прямых волн) или $\text{Im} k < 0$ (для обратных волн).

Волновые числа (7) относятся к двум циркулярно поляризованным нормальным волнам киральной среды. Разложение полного электромагнитного поля на эти волновые поля (называемые полями Бельтрами) производится согласно линейной декомпозиции Борена [14]. Она первоначально была применена в сочетании с материальными уравнениями Друде – Борна – Фёдорова, но является универсально пригодной для описания киральных и простых изотропных сред:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Q}_1 - i\eta \mathbf{Q}_2, \quad \mathbf{H} = \mathbf{Q}_2 - i\zeta \mathbf{Q}_1, \quad (8)$$

где комплексные амплитуды \mathbf{Q}_1 и \mathbf{Q}_2 относятся к полям левой и, соответственно, правой круговой поляризации, а параметр $\eta = \zeta^{-1}$ является волновым сопротивлением. В однородной и безграничной среде поля Бельтрами не связаны между собой. Первое поле \mathbf{Q}_1 представляет собой электромагнитное поле с векторами $\mathbf{E}_1 = \mathbf{Q}_1$ и $\mathbf{H}_1 = -i\zeta \mathbf{Q}_1$, второе поле \mathbf{Q}_2 – электромагнитное поле с векторами $\mathbf{E}_2 = -i\eta \mathbf{Q}_2$ и $\mathbf{H}_2 = \mathbf{Q}_2$. Подстановка (8) в (3) приводит к дифференциальным уравнениям Бельтрами, в которых вектор поля пропорционален своему ротору, а подстановка непосредственно в (4) – к двум векторным уравнениям

$$\boldsymbol{\gamma}_1 \times \mathbf{Q}_1 + i\gamma_1 \mathbf{Q}_1 = 0, \quad \boldsymbol{\gamma}_2 \times \mathbf{Q}_2 - i\gamma_2 \mathbf{Q}_2 = 0. \quad (9)$$

Первое уравнение в (9) приводится к простейшему виду

$$\hat{\boldsymbol{\gamma}} \times \mathbf{Q}_1 + i\mathbf{Q}_1 = 0 \quad (10)$$

с направлением вращения плоскости поляризации по левому винту относительно положительной нормали к фазовому фронту $\hat{\boldsymbol{\gamma}}$. Направление вектора фазовой скорости волны в киральной среде может, однако, оказаться противоположным направлению потока энергии. Второе уравнение принимает вид

$$\hat{\boldsymbol{\gamma}} \times \mathbf{Q}_2 - i\mathbf{Q}_2 = 0, \quad (11)$$

согласно которому направление вращения происходит по правому винту, т.е. противоположно направлению для поля \mathbf{Q}_1 . При переходе от (3) или (4) к (9) выявляются альтернативные соотношения для волнового числа в некиральной среде

$$k = \omega \varepsilon \eta = \omega \mu \zeta. \quad (12)$$

Из (12) следует, что волновое сопротивление подчиняется уравнению $\eta^2 = \mu/\varepsilon$, т.е. не содержит параметр киральности κ .

Рассчитаем средний за период вектор Пойнтинга $\mathbf{S}_1 = S_1 \hat{\mathbf{s}}_1$ для поля с амплитудой \mathbf{Q}_1 :

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1 &= \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_1^*) = \frac{1}{2} \text{Re}[\zeta^* \mathbf{Q}_1 \times (\hat{\boldsymbol{\gamma}} \times \mathbf{Q}_1^*)] = \\ &= \frac{1}{2} |\mathbf{Q}_1|^2 \text{Re} \zeta \hat{\boldsymbol{\gamma}} = \frac{1}{2} |\mathbf{Q}_1|^2 (\hat{\boldsymbol{\gamma}} \cdot \hat{\mathbf{s}}_1) \text{Re} \zeta \hat{\mathbf{s}}_1. \end{aligned} \quad (13)$$

(Знак «*» обозначает операцию комплексного сопряжения.) Из (13) следует, что

$$S_1 = \frac{1}{2} |\mathbf{Q}_1|^2 \hat{\boldsymbol{\gamma}} \cdot \hat{\mathbf{s}}_1 \operatorname{Re}(\zeta) > 0, \quad (14)$$

где присутствует скалярное произведение ортов волнового вектора и вектора Пойнтинга $a_1 = \hat{\boldsymbol{\gamma}} \cdot \hat{\mathbf{s}}_1$, которое является идентификатором типа нормальной волны. Действительно, идентификатор принимает одно из двух возможных значений: $a_1 = +1$, если нормальная волна является прямой волной, и $a_1 = -1$, если она является обратной волной. Аналогично для среднего вектора Пойнтинга $\mathbf{S}_2 = S_2 \hat{\mathbf{s}}_2$ поля Бельтрами \mathbf{Q}_2 имеем

$$\begin{aligned} S_2 &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_2^*) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\eta \mathbf{Q}_2^* \times (\hat{\boldsymbol{\gamma}} \times \mathbf{Q}_2)] = \\ &= \frac{1}{2} |\mathbf{Q}_2|^2 \operatorname{Re} \eta \hat{\boldsymbol{\gamma}} = \frac{1}{2} |\mathbf{Q}_2|^2 (\hat{\boldsymbol{\gamma}} \cdot \hat{\mathbf{s}}_2) \operatorname{Re} \eta \hat{\mathbf{s}}_2, \end{aligned} \quad (15)$$

откуда

$$S_2 = \frac{1}{2} |\mathbf{Q}_2|^2 \hat{\boldsymbol{\gamma}} \cdot \hat{\mathbf{s}}_2 \operatorname{Re}(\eta) > 0, \quad (16)$$

где $a_2 = \hat{\boldsymbol{\gamma}} \cdot \hat{\mathbf{s}}_2$. Из (14) и (16) следует, что

$$a_1 = \operatorname{sgn}(\operatorname{Re} \zeta) = a_2 = \operatorname{sgn}(\operatorname{Re} \eta) = a, \quad (17)$$

где $a = \hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{s}}$ есть идентификатор типа волны в некиральной среде с ортом потока энергии $\hat{\mathbf{s}}$. Формула (17) позволяет конкретизировать аналитическую структуру волнового сопротивления, а именно, следует положить

$$\eta = a\eta_r + i\eta_i, \quad (18)$$

где $\eta_r > 0$, подчеркнув, что (18) будет справедливо как для некиральных, так и для киральных изотропных сред с потерями.

Волновое число k в поглощающей среде, имея в виду принцип предельного поглощения, должно быть представлено обобщенно в виде

$$k = k_r + iak_i, \quad (19)$$

где $k_r > 0$ и $k_i > 0$. Представления (18) и (19) согласуются с формулами $k\eta = \omega\mu$ и $k\zeta = \omega\varepsilon$, которые следуют из (12) и обеспечивают прямую связь волновых параметров с проницаемостями среды. В пределе нулевых потерь они дают правильное значение идентификатора

$$a = \operatorname{sgn}(\varepsilon) = \operatorname{sgn}(\mu), \quad (20)$$

так как в «дважды отрицательных» средах распространяются только обратные нормальные волны. В поглощающей среде, как показано в [11, 15], этот идентификатор определяется по формуле

$$a = \operatorname{sgn} \left(\frac{\varepsilon_r + \mu_r}{|\varepsilon| + |\mu|} \right). \quad (21)$$

Её можно преобразовать к виду

$$a = \operatorname{sgn} \left(\cos \frac{\arg \varepsilon + \arg \mu}{2} \right), \quad (22)$$

где аргументы комплексных проницаемостей не выходят за пределы промежутка $[0, \pi]$.

По аналогии с (19) волновое число γ_1 представим как

$$\gamma_1 = \gamma_{1r} + ib_1 \gamma_{1i}, \quad (23)$$

где b_1 – идентификатор типа волны в киральной среде с волновым числом γ_1 , $\gamma_{1r} > 0$, $\gamma_{1i} > 0$. Сопоставляя (7) и (23), получаем

$$\operatorname{Im}(\gamma_1) = b_1 \gamma_{1i} = \operatorname{Im}(\tilde{\gamma}_1) \operatorname{sgn}(\operatorname{Re} \tilde{\gamma}_1), \quad (24)$$

откуда сразу следует

$$b_1 = \operatorname{sgn}[(k_r + \omega\kappa_r)(ak_i + \omega\kappa_i)], \quad (25)$$

$$\gamma_{1i} = |ak_i + \omega\kappa_i|. \quad (26)$$

Как видно из (25), собственно киральные потери способны изменить тип нормальной эванесцентной волны: обратная волна (в некиральной среде) переходит в прямую волну при условии, что $k_i < \omega\kappa_i$. Однако если в некиральной среде распространяется прямая волна, то усиление потерь за счёт добавления киральности (при $\kappa_i > 0$) не приводит к изменению типа волны.

Волновое число γ_2 представим как

$$\gamma_2 = \gamma_{2r} + ib_2 \gamma_{2i}, \quad (27)$$

где $\gamma_{2r} > 0$, $\gamma_{2i} > 0$ и b_2 является идентификатором типа волны с волновым числом γ_2 . Из (7) для γ_2 в развёрнутом виде имеем:

$$\gamma_2 = |k_r - \omega\kappa_r| + i(ak_i - \omega\kappa_i) \operatorname{sgn}(k_r - \omega\kappa_r). \quad (28)$$

Из сопоставления (27) и (28) находим

$$b_2 = \operatorname{sgn}[(k_r - \omega\kappa_r)(ak_i - \omega\kappa_i)]. \quad (29)$$

Налицо присутствует достаточно сложная зависимость идентификатора b_2 от параметров среды. Если в некиральной среде нормальная волна является обратной (идентификатор $a = -1$), то она переходит в прямую волну в киральной среде с $\kappa_i > 0$, как только наступит неравенство $\omega\kappa_r > k_r$. Если же волна в некиральной среде была прямой, то тип волны сохраняется, только если одновременно $\omega\kappa_r > k_r$ и $\omega\kappa_i > k_i$ или $\omega\kappa_r < k_r$ и $\omega\kappa_i < k_i$.

Таким образом, тип нормальных волн в киральной поглощающей среде Теллегена довольно сложным образом зависит от соотношения действительных и мнимых частей материальных параметров. Он выявляется посредством вычисления специально введённых дополнительных параметров – идентификаторов типа волны.

Литература

1. Jaggard D.L. On electromagnetic waves in chiral media / D.L. Jaggard, A.R. Mickelson, C.H. Papas // Applied Physics. – 1979. – Vol. 18, No. 2. – P. 211–216.
2. Cloete J.H. The role of chirality and resonance in synthetic microwave absorbers / J.H. Cloete, M. Bingle, D.B. Davidson // AEÜ – International Journal of Electronics and Communications. – 2001. – Vol. 55, No. 4. – P. 233–239.
3. Microwave absorption characteristics of chiral materials with Fe₃O₄-polyaniline composite matrix / G.C. Sun, K.L. Yao, H.X. Liao, Z.C. Niu, Z.L. Liu // International Journal of Electronics. – 2000. – Vol. 87, No. 6. – P. 735–740.

4. Лагарьков А.Н. Радиопоглощающие материалы на основе метаматериалов / А.Н. Лагарьков, В.Н. Кисель, В.П. Семенов // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 10. – С. 1119–1127.
5. Фисанов В.В. Электромагнитные волны в изотропной метакиральной среде // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 1 (35). – С. 5–8.
6. Jaggard D.L. Chiroorb™ as an invisible medium / D.L. Jaggard, N. Engheta // Electronics Letters. – 1989. – Vol. 25, No. 3. – P. 173–174.
7. Ge F. Reflection characteristics of chiral microwave absorbing coatings / F. Ge, L. Chen, J. Zhu // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1996. – Vol. 17, No. 1. – P. 255–268.
8. Ruotanen L.H. Experimental verification of physical conditions restricting chiral material parameters / L.H. Ruotanen, A. Hujanen // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 1997. – Vol. 11, No. 1. – P. 21–35.
9. Liao S.B. Reflectance of a chiral plate absorber / S.B. Liao, G.J. Yin // Applied Physics Letters. – 1993. – Vol. 62, No. 20. – P. 2480–2482.
10. Sihvola A. Condition for chiral material parameters revisited // Microwave and Optical Technology Letters. – 2001. – Vol. 31, No. 6. – P. 423–426.
11. Фисанов В.В. Прямые и обратные плоские волны в обобщенной изотропной среде // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 10. – С. 36–40.
12. Silverman M.P. Reflection and refraction at the surface of a chiral medium: comparison of gyrotropic constitutive relations invariant or noninvariant under a duality transformation // Journal of the Optical Society of America. A. – 1986. – Vol. 3, No. 6. – P. 830–837.
13. Silverman M.P. Waves and grains: reflections on light and learning. – Princeton: Princeton University Press, 1998. – 411 p.
14. Bohren C.F. Light scattering by an optically active sphere // Chemical Physics Letters. – 1974. – Vol. 21, No. 3. – P. 458–462.
15. Фисанов В.В. Показатель преломления и волновое сопротивление однородных плоских волн в изотропных средах с потерями и усилением // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 5. – С. 47–51.

Фисанов Василий Васильевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотр. СФТИ при НИ ТГУ, профессор каф. радиофизики Национального исследовательского Томского государственного ун-та (НИ ТГУ) Ленина пр-т, д. 34, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-20-78
Эл. почта: fisanov@mail.tsu.ru

Fisanov V.V.

Wave parameters of an isotropic chiral medium with losses

Plane electromagnetic waves in an isotropic absorbing chiral medium (chiral metamaterial) are considered. The Tellegen's system of constitutive relations with complex values of dielectric permittivity, magnetic permeability and chirality parameter is applied. A distinction is made between the forward and backward evanescent normal waves of left and right circular polarizations by introducing a special parameter – a wave type identifier. Analytical expressions for real and imaginary parts of wave numbers and wave impedance of homogeneous normal waves are presented.

Keywords: isotropic chiral medium, metamaterial, dissipative losses, complex material parameters, forward normal waves, backward normal waves, wave type identifier, wave number, wave impedance.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-7-10

References

1. Jaggard D.L., Mickelson A.R., Papas C.H. On electromagnetic waves in chiral media. *Applied Physics*, 1979, vol. 18, no. 2, pp. 211–216.
2. Cloete J.H., Bingle M., Davidson D.B. The role of chirality and resonance in synthetic microwave absorbers. *AEÜ – International Journal of Electronics and Communications*, 2001, vol. 55, no. 4, pp. 233–239.
3. Sun G.C., Yao K.L., Liao H.X., Niu Z.C., Liu Z.L. Microwave absorption characteristics of chiral materials with Fe₃O₄-polyaniline composite matrix. *International Journal of Electronics*, 2000, vol. 87, no. 6, pp. 735–740.
4. Lagar'kov A.N., Kisel' V.N., Semenenko V.N. Radar absorbers based on metamaterials. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2012, vol. 57, no. 10, pp. 1122–1129.
5. Fisanov V.V. Electromagnetic waves in an isotropic metachiral medium. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, no. 1 (35), pp. 5–8 (in Russ.).
6. Jaggard D.L., Engheta N. Chiroorb™ as an invisible medium. *Electronics Letters*, 1989, vol. 25, no. 3, pp. 173–174.
7. Ge F., Chen L., Zhu J. Reflection characteristics of chiral microwave absorbing coatings. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1996, vol. 17, no. 1, pp. 255–268.
8. Ruotanen L.H., Hujanen A. Experimental verification of physical conditions restricting chiral material parameters. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1997, vol. 11, no. 1, pp. 21–35.
9. Liao S.B., Yin G.L. Reflectance of a chiral plate absorber. *Applied Physics Letters*, 1993, vol. 62, no. 20, pp. 2480–2482.
10. Sihvola A. Condition for chiral material parameters revisited. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2001, vol. 31, no. 6, pp. 423–426.
11. Fisanov V.V. Forward and backward plane waves in a generalized isotropic medium. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 57, no. 10, pp. 1336–1341.
12. Silverman M.P. Reflection and refraction at the surface of a chiral medium: comparison of gyrotropic constitutive relations invariant or noninvariant under a duality transformation. *Journal of the Optical Society of America. A*, 1986, vol. 3, no. 6, pp. 830–837.
13. Silverman M.P. *Waves and grains: reflections on light and learning*. Princeton, Princeton University Press, 1998. 411 p.
14. Bohren C.F. Light scattering by an optically active sphere. *Chemical Physics Letters*, 1974, vol. 21, no. 3, pp. 458–462.
15. Fisanov V.V. Refractive index and wave resistance of homogeneous plane waves in isotropic media with losses and gain. *Russian Physics Journal*, 2017, vol. 60, no. 5, pp. 797–802.

Vasilii V. Fisanov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Radiophysics, National Research Tomsk State University (TSU) 36, Lenin av., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-20-78
Email: fisanov@mail.tsu.ru

УДК 621.317.33

Э.В. Семенов, О.Ю. Малаховский

Измерение больших значений добротности емкостных объектов прямым методом с использованием специальной калибровки измерителя импеданса

Рассмотрена проблема измерения добротности величиной более 1000. Указаны максимальные значения добротности емкостных объектов, при которых современные измерители импеданса дают удовлетворительную погрешность измерения добротности. Показано, что с применением предлагаемого подхода к калибровке измерителей импеданса верхняя граница диапазона измерения добротности увеличивается на два порядка при сохранении приемлемой погрешности измерения.

Ключевые слова: добротность, измерение, варикапы, конденсаторы, малые потери.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-11-16

Добротность (потери) является ключевым параметром ряда электрорадиоэлементов, таких, например, как варикапы и конденсаторы.

Существует большое количество различных методов измерения добротности и тангенса угла потерь [1]. Наилучшие результаты дают методы, при которых внутри исследуемого диэлектрика возбуждается резонанс того или иного типа [2–3]. Однако такие методы непригодны, если нужно измерить потери не материала, а прибора (варикапа, конденсатора), причем на относительно низких частотах.

При измерении добротности приборов емкостной объект включается в контур с индуктивным характером импеданса. Это может быть катушка индуктивности [4] либо линия передачи [5]. При этом потери в индуктивной части контура являются значимыми. Для их снижения в [6] предлагается охлаждение индуктивности до температуры жидкого азота.

Все резонансные методы неудобны тем, что при необходимости измерения добротности на фиксированной частоте для объекта с новым значением емкости требуется разрабатывать новую резонансную систему. Поэтому практически удобным является прямой метод измерения добротности – на измерителе импеданса определяют комплексное сопротивление объекта измерения, из которого и находят добротность. Однако установки, на которых данным методом можно измерять добротность порядка 1000 или более, уникальны [7]. На серийных измерителях импеданса измерять такую добротность нельзя.

Существует и ряд нетрадиционных методов измерения добротности. К ним, например, относится вычисление добротности диэлектрического материала по результатам измерения ослабления, вносимого линией передачи с этим материалом [8]. Уменьшения погрешности измерения можно также достигать за счет преобразования результатов измерения из частотной области во временную с последующей обработкой [9]. Потенциально хорошие результаты обещает также короткоимпульсный метод характеристики емкостных объектов [10–12]. Однако перечисленные подходы находятся только в стадии становления.

Таким образом, актуальным является уменьшение погрешности измерения добротности прямым методом.

Цель настоящей статьи – рассмотреть метод дополнительной калибровки измерителя импеданса, при котором удается существенно уменьшить погрешность измерения больших значений добротности емкостных объектов.

Метрологические свойства современных измерителей импеданса

Практически важной для характеристики емкостных объектов (в частности, варикапов) является частота 50 МГц. Для данной частоты измерители импеданса выполняются либо по четырехпроводной схеме (например, Wayne Kerr 6500B), либо как рефлектометры (Agilent E4991A). Последний гораздо удобней в эксплуатации, так как имеет ряд высококачественных присоединительных устройств, однако погрешность измерения добротности получается неудовлетворительной.

Штатно в измерителе импеданса Agilent E4991A предусмотрено два режима калибровки: short / open / load (далее – SOL) и short / open / load / low loss capacitor (далее – SOLC). Следует, однако, учитывать, что четыре калибровочных меры применить одновременно невозможно, так как при калибровке определяются параметры взаимного четырехполюсника погрешностей, в матрице которого всего три независимых элемента [13].

Из руководства к прибору Agilent E4991A [14] следует, что калибровка SOLC дает меньшую погрешность измерения добротности. Исследования, однако, показывают, что производитель не указал важное условие: данное преимущество реализуется только на частотах выше 400 МГц. На рис. 1 приведены измерения частотной зависимости тангенса угла потерь $D = 1/Q$ калибровочного конденсатора с малыми потерями (из набора калибровочных мер Agilent E4991A) для калибровки SOL и SOLC. Действительное значение D калибровочного конденсатора принимается равным нулю (конденсатор с воздушным диэлектриком). Из рис. 1 видно, что преимущество от применения калибровки SOLC начи-

нается только от 400 МГц. Таким образом, применение калибровки SOLC на интересующей нас частоте 50 МГц бессмысленно.

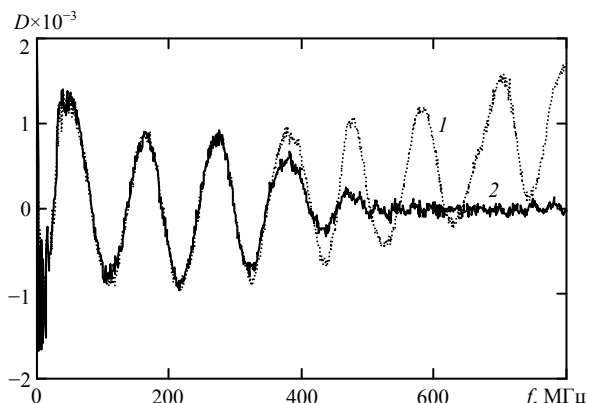


Рис. 1. Измеренная на приборе Agilent E4991A частотная зависимость тангенса угла потерь калибровочного конденсатора с малыми потерями при калибровках SOL (кривая 1) и SOLC (кривая 2)

Относительная погрешность измерения добротности при выполнении калибровки SOL равна [14]:

$$\delta Q = \pm(E_a + E_b)Q_x, \quad (1)$$

где Q_x – измеренное значение добротности; E_a – основная относительная погрешность измерения (0,65% в диапазоне частот до 100 МГц); E_b – относительная погрешность, возникающая из-за остаточной (после калибровки) погрешности измерения импеданса короткого замыкания и холостого хода. E_b находится как сумма относительных погрешностей измерения импеданса короткого замыкания и холостого хода:

$$E_b = \pm(Z_s/|Z_x| + Y_o/|Z_x|),$$

где Z_x – импеданс объекта измерения; Z_s – абсолютная погрешность измерения импеданса короткого замыкания; Y_o – абсолютная погрешность измерения адмиттанса холостого хода. Для Agilent E4991A на частоте 50 МГц $Z_s = 38$ мОм, $Y_o = 10$ мкСм. Для практически важного диапазона емкостей 2,5–5 пФ получается $E_b = 1,3$ –0,64%.

Будем считать допустимой относительную погрешность измерения, равную 30%. Подставив это значение в (1) и учитывая приведенные значения $E_{a,b}$, получим для емкостей 2,5–5 пФ на частоте 50 МГц верхнюю границу диапазона измерения добротности 15–23, что не удовлетворяет большинству задач по измерению добротности.

Источники остаточной погрешности измерения добротности в измерителях импеданса
Проанализируем, что является источником большой остаточной (после калибровки) погрешности измерения.

Прибором Agilent E4991A напрямую измеряется коэффициент отражения, прочие параметры вычисляются из него. Поэтому рассмотрим зависимость погрешности измерения коэффициента отражения от значения коэффициента отражения (табл.).

Зависимость погрешности измерения коэффициента отражения от значения коэффициента отражения Γ

Мера	Действительное значение Γ		Модуль абсолютной погрешности измерения Γ
	Модуль	Фаза	
Load	0	–	4×10^{-7}
Short	1	180°	8×10^{-8}
Open	1	$-0,148^\circ$	3×10^{-7}
Low loss cap.	1	$-3,44^\circ$	3×10^{-5}

Результаты в таблице приведены для частоты 50 МГц. Результат измерения получен при усреднении 99900 наблюдений, поэтому составляющую погрешности, связанную с тепловыми шумами измерительных усилителей Agilent E4991A, можно не учитывать. Измерения проводятся в отношении мер из комплекта прибора, поэтому действительное значение их коэффициента отражения известно. Первые три меры (short, open, load) используются при калибровке прибора. Четвертая (low loss capacitor) в калибровке не участвовала.

Из таблицы видно, что для мер, участвовавших в калибровке, погрешность измерения коэффициента отражения составляет порядка 10^{-7} , а для меры, не участвовавшей в калибровке, – порядка 10^{-5} . Другими словами, остаточная (после калибровки) погрешность измерения связана, в основном, с отличием импеданса объекта измерения от импеданса калибровочных мер.

Предлагаемый метод калибровки для прецизионного измерения добротности прямым методом

Для того чтобы уменьшить остающуюся после калибровки погрешность измерения, предлагается использовать калибровочную меру, импеданс которой максимально близок к импедансу объекта измерения. Для емкостных объектов измерения роль такой калибровочной меры будут выполнять конденсаторы, емкость которых C близка к емкости объекта измерения.

Вычисляемую с использованием калибровочного конденсатора поправку удобнее всего определять в отношении последовательного сопротивления потерь, а не добротности, так как в этом случае она получается аддитивной. Поправка также будет аддитивной и в отношении тангенса угла потерь, однако последовательное сопротивление потерь удобнее и по другой причине. Добротность конденсаторов с малыми потерями определяется, в основном, электропроводностью их обкладок, которую удобнее характеризовать также последовательным сопротивлением потерь.

Таким образом, мы определяем поправку DR , вычисляемую как разность между измеренным значением последовательного сопротивления потерь калибровочного конденсатора $R_{ик}$ и его действительным последовательным сопротивлением потерь R_k :

$$DR = R_{ик} - R_k. \quad (1)$$

Последовательное сопротивление потерь объекта измерения R определяют по формуле

$$R = R_{и} - DR, \quad (2)$$

где R_n – неисправленное последовательное сопротивление потерь объекта измерения. Далее рассчитывается добротность объекта измерения Q по формуле

$$Q = 1/(2\pi fCR).$$

Методика измерения последовательного сопротивления потерь калибровочных конденсаторов

Предлагаемый метод калибровки подразумевает, что последовательное сопротивление потерь калибровочного конденсатора известно. С другой стороны, разнообразие объектов измерения потребует и широкой номенклатуры калибровочных конденсаторов. Практический выход из данной ситуации состоит в том, чтобы в качестве калибровочных конденсаторов использовать конденсаторы общего применения, определив каким-либо образом их последовательное сопротивление потерь.

Предлагается следующая методика измерения последовательного сопротивления потерь калибровочных конденсаторов.

Во-первых, исходя из описания производителя, отбирают конденсаторы, последовательное сопротивление потерь которых частотно-независимо примерно на декаду вверх от частоты измерения добротности (в нашем случае 50 МГц). Например, для конденсатора Murata GJM1555C1H5R0WB01 номинальной емкостью 5,1 пФ производитель указывает [15], что номинальное последовательное сопротивление потерь конденсатора равно 0,10 Ом в диапазоне частот до 980 МГц. С физической точки зрения это означает, что основным фактором потерь в данном диапазоне частот является электропроводность обкладок R_k .

Дополнительно выполнение данного условия можно подтвердить, наблюдая неравномерность частотной зависимости последовательного сопротивления потерь по результатам ее наблюдения на измерителе импеданса.

Во-вторых, выбирают частоту, на которой будет оцениваться электропроводность обкладок калибровочного конденсатора. Она может быть любой в пределах равномерного участка сопротивления потерь конденсатора.

Однако для того чтобы иметь малую погрешность измерения, обусловленную калибровкой SOLC, выберем частоту измерения, равную 550 МГц.

Как следует из [14], при использовании калибровки SOLC и для больших значений добротности абсолютная погрешность измерения последовательного сопротивления потерь на приборе Agilent E4991A выражается формулой

$$\Delta R = E_c / (2\pi fC),$$

где E_c – относительная погрешность измерения угла потерь: $E_c = \pm(6 \times 10^{-4} + 8 \times 10^{-11}f)$. Для частоты 550 МГц получается $E_c = 1,0 \times 10^{-3}$.

Для измеряемых емкостей 5 пФ получаем $\Delta R_k = \pm 0,06$ Ом.

Оценивание остаточной погрешности измерения при использовании предлагаемой калибровки

Остаточная погрешность измерения с применением предлагаемой калибровки будет зависеть от трех факторов.

Первый фактор – шумы измерительного тракта измерителя импеданса. Влияние этого фактора можно нивелировать за счет усреднения, однако должно быть определено минимальное количество усредняемых наблюдений, при котором будет обеспечена заданная погрешность.

Второй фактор – долговременная (десять минут – часы) нестабильность коэффициентов усиления и смещений в измерительном тракте измерителя импеданса, вызванная изменением параметров окружающей среды и питания. Эту нестабильность необходимо оценить.

Третий фактор – отличие импедансов объекта измерения и калибровочного конденсатора. В общем случае значимость этого фактора необходимо оценивать. Мы, однако, рассмотрим случай, когда несоответствие импеданса объекта и меры можно сделать весьма малым. Это задача измерения добротности варикапов с малыми потерями. В первом приближении соответствие импедансов обеспечивается выбором емкости калибровочного конденсатора равной номинальной емкости варикапа. Далее перед измерением добротности емкость варикапа регулировкой напряжения на нем устанавливается равной емкости калибровочного конденсатора. Поэтому в настоящей работе данным фактором погрешности мы пренебрегаем.

Чтобы оценить необходимое количество усредняемых наблюдений, необходимо выполнить многократные наблюдения последовательного сопротивления потерь на приборе Agilent E4991A при требуемой частоте измерения (50 МГц) в отношении объекта с нужной емкостью.

Для примера выполним указанные наблюдения в отношении конденсатора Murata GRM1885C1H5R1C. Действительное значение емкости конденсатора составляет 5,0 пФ. На рис. 2 приведено 800 однократных наблюдений сопротивления потерь данного конденсатора на частоте 50 МГц. Среднеквадратическое отклонение данных наблюдений составляет 0,20 Ом. Коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 95% составляет 1,96. Таким образом, предельное значение абсолютной случайной погрешности $R_{сл}$ для одиночного измерения составит $\pm 0,39$ Ом. Если мы будем усреднять 800 измерений, то случайная погрешность результата измерения $R_{сл}$ будет равна $\pm 0,014$ Ом.

В соответствии с (1)–(2) сопротивление потерь объекта измерения вычисляется по формуле

$$R = R_n - R_{нк} + R_k.$$

Погрешность измерения ΔR следует искать в виде

$$\Delta R = \pm(\sqrt{2}R_{сл} + \Delta R_n + \Delta R_k), \quad (3)$$

где $\Delta R_{сл}$ – случайная погрешность измерения последовательного сопротивления потерь калибровочного

конденсатора или объекта измерения, ΔR_n – погрешность измерения разности $R_n - R_{нк}$, возникающая за счет медленного дрейфа параметров окружающей среды и питания прибора, ΔR_k – погрешность действительного значения последовательного сопротивления потерь калибровочного конденсатора (в нашем примере $\pm 0,06$ Ом). Случайные погрешности измерения сопротивления потерь калибровочного конденсатора и объекта измерения статистически независимы и хорошо укладываются в нормальный закон (рис. 2), поэтому в (3) указано их среднеквадратическое значение. Закон распределения ΔR_n и ΔR_k неизвестен, поэтому в (3) они входят аддитивно.

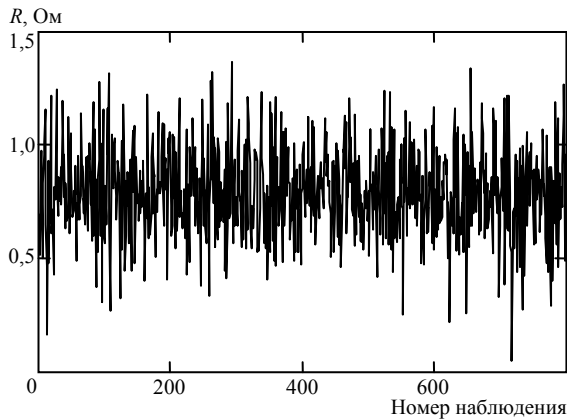


Рис. 2. 800 однократных наблюдений последовательного сопротивления потерь конденсатора Murata GRM1885C1H5R1C (частота измерения 50 МГц)

При усреднении 800 наблюдений слагаемое $\sqrt{2}R_{сл}$ в (3) получается равным $\pm 0,02$ Ом.

Для определения ΔR_n нужно выполнить долговременные наблюдения последовательного сопротивления потерь объекта с нужной емкостью. На рис. 3 приведена зависимость результата измерения последовательного сопротивления потерь Murata GRM1885C1H5R1C (5,0 пФ) от времени. Измерения выполнены на частоте 50 МГц. При этом каждый результат измерения получен усреднением 800 наблюдений. Измерения выполнялись в одной из обычных лабораторий АО «НИИПП» без кондиционирования воздуха, экранирования и стабилизации сетевого напряжения. Штриховыми линиями приведены границы погрешности измерений для $\Delta R_n = \pm 0,03$ Ом. Видно, что результаты измерения укладываются в эти границы на интервале времени 16 мин. Таким образом, мы можем принять $\Delta R_n = \pm 0,03$ Ом, если установим, что калибровка прибора посредством калибровочного конденсатора будет выполняться каждые 15 мин. Лучшие результаты могут быть получены в специальных помещениях со стабилизированными параметрами окружающей среды и питания прибора.

Теперь получаем, что общая погрешность измерения последовательного сопротивления потерь на приборе Agilent E4991A с применением предлагаемой калибровки составит 0,11 Ом. Для емкости объекта измерения 5 пФ и добротности 1800 это дает

относительную погрешность измерения добротности $\pm 30\%$.

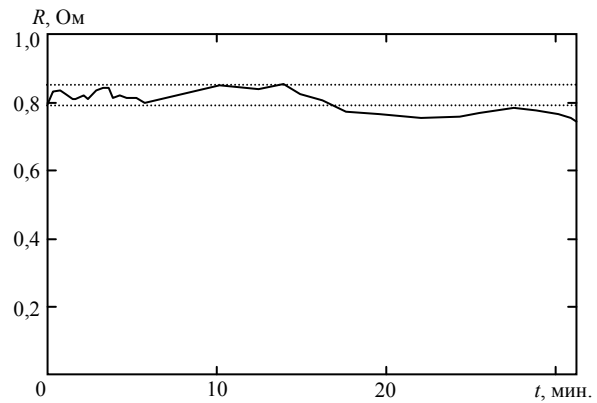


Рис. 3. Долговременный дрейф результата измерения последовательного сопротивления потерь конденсатора Murata GRM1885C1H5R1C на измерителе импеданса Agilent E4991A (частота измерения 50 МГц). Пунктирные линии – доверительный интервал для погрешности измерения $\pm 0,03$ Ом

Заключение

Основным источником остаточной погрешности (после калибровки) в измерителях импеданса является отличие импеданса объекта измерения от импеданса калибровочных мер.

Чем бы ни было вызвано такое отличие, очевидным подходом к уменьшению остаточной погрешности является использование калибровочных мер, импеданс которых максимально близок к импедансу объекта.

Универсальным решением в этом смысле при измерении добротности емкостных объектов является применение в составе калибровочных мер конденсатора с малыми потерями. Такое решение применяется в современных измерителях импеданса, например, Agilent E4991A: к мерам короткого замыкания, холостого хода и согласованной нагрузки добавляется конденсатор с малыми потерями.

Однако все четыре меры не могут быть использованы одновременно, так как система калибровочных уравнений становится переопределенной. Для каждой частоты используется только три меры.

Производитель прибора Agilent E4991A определил, что конденсатор с малыми потерями включается в состав калибровочных мер только начиная с частоты 400 МГц. В практически важном диапазоне до 400 МГц преимуществ от такой калибровки получить невозможно. В итоге на частоте 50 МГц для емкости порядка нескольких пикофарад максимальная измеряемая добротность составляет всего около 20 (при относительной погрешности измерения $\pm 30\%$).

Более эффективным, хотя и менее универсальным, решением является применение калибровочной меры, емкость которой максимально близка к емкости объекта измерения. Диапазон емкостей таких мер, конечно, должен быть широким, поэтому практически реальным представляется использование конденсаторов общего применения, добротность которых будет определена заранее.

Для определения добротности калибровочного конденсатора предлагается выбирать, исходя из описания производителя, конденсаторы с равномерным последовательным сопротивлением потерь в области частот примерно на декаду выше частоты измерения добротности объекта измерения. Такие конденсаторы имеются на рынке в достаточном количестве. Далее, их действительное значение сопротивления потерь измеряется прибором Agilent E4991A на частоте не менее 550 МГц, где погрешность измерения получается приемлемой.

Собственно добротность объекта измерения определяется на частоте 50 МГц с использованием поправки, которая находится как разность измеренного на частоте 50 МГц последовательного сопротивления потерь калибровочного конденсатора и его действительного сопротивления потерь.

Если повторять описанную калибровку в условиях обычной лаборатории не реже каждых 15 мин, то для объекта измерения емкостью 5 пФ на частоте 50 МГц будет реализован диапазон измерения добротности до 1800 при погрешности измерения не более $\pm 30\%$. Таким образом, верхняя граница измерения добротности прибора Agilent E4991A увеличивается на два порядка.

Литература

1. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии: учеб. пособие. – Казань, 2008. – 112 с.
2. Krupka J. Measurements of the Complex Permittivity of Low Loss Polymers at Frequency Range From 5 GHz to 50 GHz // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2016. – Vol. 26, No. 6. – P. 464–466.
3. Cavity Resonator for Dielectric Measurements of High- ϵ , Low Loss Materials, Demonstrated with Barium Strontium Titanate Ceramics / Q.R. Marksteiner, M.B. Treiman, C.-F. Chen et al. // Review of Scientific Instruments. – 2017. – Vol. 88, No. 6. – 064704. – 6 p.
4. ГОСТ 18986.19–73. Варикапы. Метод измерения добротности. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 19 с.
5. Ingalls M. Measurement of the Characteristics of High-Q Ceramic Capacitors / M. Ingalls, K. Gordon // IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. – 1987. – Vol. CHMT-12, No. 4. – P. 487–495.
6. New Complex Permittivity Measurement Method at Low Frequency for Measuring Low-Loss Materials Using High Q-value LC Resonator Immersed in Liquid Nitrogen / H. Suzuki, T. Kobayashi, H. Takino, T. Nojima // IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Binjiang, China, 10–12 May 2011. – Binjiang, China, 2011. – 4 p.
7. Абросимов Э.А. Измерение параметров электрических цепей с сосредоточенными постоянными / Э.А. Абросимов, А.А. Мамонов // Измерительная техника. – 1974. – № 8. – С. 30–32.
8. Arz U. Loss Tangent Extraction Based on Equivalent Conductivity Derived from CPW Measurements // 18th IEEE Workshop on Signal and Power Integrity. Ghent, Belgium, 11–14 May 2014. – Ghent, Belgium, 2014. – 4 p.
9. Savin A.A. Additional Error Correction for Two-Port Vector Network Analyzers / A.A. Savin, V.G. Guba // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014) : Proc. of 24th Int. conf. Sevastopol, Russia, 7–13 September 2014. – Sevastopol : Veber, 2014. – Vol. 2. – P. 900–901.

10. Назаров М.А. Сопоставление квазистатической и неквазистатической видеоимпульсной модели конденсатора при различном уровне тестовых воздействий / М.А. Назаров, Э.В. Семенов // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 50–52.

11. Semyonov E.V. Ultra-Short Pulse Characterization of Dielectrics with Simultaneous Evaluation of Conduction, Relaxation Losses and Dielectric Nonlinearity // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014): Proc. of 24th Int. conf. Sevastopol, Russia, 7–13 September 2014. – Sevastopol : Veber, 2014. – Vol. 2. – P. 912–913.

12. Nazarov M.A. Specificity of Inaccuracy of Indirect Measurements of Capacitance-Voltage Characteristics by Means of Ultra-Short Pulse Method / M.A. Nazarov, E.V. Semyonov // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014) : Proc. of 24th Int. conf. Sevastopol, Russia, 7–13 September 2014. – Sevastopol: Veber, 2014. – Vol. 2. – P. 948–949.

13. Ferrero A. Multiport Vector Network Analyzer Calibration: A General Formulation / A. Ferrero, F. Sanpietro, U. Pisani // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1994. – Vol. 42, No. 12. – P. 2455–2461.

14. Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer. Operation Manual. – 9th ed. / Agilent Technologies. – 2012. – 488 p. – URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/E4991-90090.pdf> (дата обращения: 02.12.2018).

15. SimSurfing (WEB). Multilayer Ceramic Capacitors / Murata Manufacturing Corporation. – URL: <http://ds.murata.co.jp/simsurfing/mlcc.html?lcid=en-us> (дата обращения: 02.12.2018).

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. отд. полупроводниковых приборов АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (АО «НИИПП»), профессор каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Красноармейская ул., д. 99 а, г. Томск, Россия, 634034 Тел.: +7 (382-2) 41-33-65 Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Малаховский Олег Юрьевич

Канд. физ.-мат. наук, нач. лаб. 42 отд. полупроводниковых приборов АО «НИИПП» Красноармейская ул., д. 99 а, г. Томск, Россия, 634034 Тел.: +7 (382-2) 28-84-92 Эл. почта: malakhovskiy_oy@niipp.ru

Semyonov E.V., Malakhovskij O.Yu.

Measurement of High-Values Quality Factor of Capacitive Objects by the Direct Method Using a Special Calibration of Impedance Meter

The problem of the quality factor measurement of more than 1000 is considered. The maximum values of the capacitive objects Q-factor are indicated, at which modern impedance meters give a satisfactory error. It is shown that the proposed approach to the calibration of impedance meters increases the upper limit of the Q-factor measurement range by two orders of magnitude while maintaining an acceptable measurement error.

Keywords: Q-factor, measurement, variable capacitance diodes, capacitors, small losses.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-11-16

References

1. Gusev Ju.A. *Osnovy dijelektricheskoy spektroskopii : uchebnoe posobie* [Fundamentals of dielectric spectroscopy: a tutorial]. Kazan', 2008. 112 p. (in Russ.).
2. Krupka J. Measurements of the Complex Permittivity of Low Loss Polymers at Frequency Range From 5 GHz to 50 GHz. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, vol. 26, no. 6, pp. 464–466.
3. Marksteiner Q.R., Treiman M.B., Chen C.-F., Haynes W.B., Reiten M.T., Dalmas D., Pulliam E. Cavity Resonator for Dielectric Measurements of High- ϵ , Low Loss Materials, Demonstrated with Barium Strontium Zirconium Titanate Ceramics. *Review of Scientific Instruments*, 2017, vol. 88, no. 6, 064704, 6 p.
4. GOST 18986.19-73. *Varikapy. Metod izmerenija dobrotnosti*. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 2004. 19 p.
5. Ingalls M., Gordon K. Measurement of the Characteristics of High-Q Ceramic Capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1987, vol. CHMT-12, no. 4, pp. 487–495.
6. Suzuki H., Kobayashi T., Takino H., Nojima T. New Complex Permittivity Measurement Method at Low Frequency for Measuring Low-Loss Materials Using High Q-value LC Resonator Immersed in Liquid Nitrogen. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Binjiang, China, 2011. 4 p.
7. Abrosimov E.A., Mamonov A.A. Measurement of Parameters of Electrical Circuits with Lumped Constants. *Izmeritel'naya Tekhnika*, 1974, no. 8, pp. 30–32.
8. Arz U. Loss Tangent Extraction Based on Equivalent Conductivity Derived from CPW Measurements. *18th IEEE Workshop on Signal and Power Integrity*. Ghent, Belgium, 2014. 4 p.
9. Savin A.A., Guba V.G. Additional Error Correction for Two-Port Vector Network Analyzers. *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014)*. Proc. of 24th Int. conf. Sevastopol, Russia, Veber, 2014, vol. 2, pp. 900–901.
10. Nazarov M.A., Semyonov E.V. Investigation of Ultra-Short Pulsed Capacitor Model. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 50–52 (in Russ.).
11. Semyonov E.V. Ultra-Short Pulse Characterization of Dielectrics with Simultaneous Evaluation of Conduction, Relaxation Losses and Dielectric Nonlinearity. *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014)*. Proc. of 24th Int. conf. Sevastopol, Russia, Veber, 2014, vol. 2, pp. 912–913.
12. Nazarov M.A., Semyonov E.V. Specificity of Inaccuracy of Indirect Measurements of Capacitance-Voltage Characteristics by Means of Ultra-Short Pulse Method. *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo '2014)*. Proc. of 24th Int. conf. Sevastopol, Russia, Veber, 2014, vol. 2, pp. 948–949.
13. Ferrero A., Sanpietro F., Pisani U. Multiport Vector Network Analyzer Calibration: A General Formulation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1994, vol. 42, no. 12, pp. 2455–2461.
14. *Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer. Operation Manual. – 9-th ed.* Agilent Technologies, 2012. 488 p. Available at: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/E4991-90090.pdf> (accessed: December 02, 2018).
15. *SimSurfing (WEB). Multilayer Ceramic Capacitors*. Murata Manufacturing Corporation. Available at: <http://ds.murata.co.jp/simsurfing/mlcc.html?lcid=en-us> (accessed: December 02, 2018).

Edward V. Semyonov

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
Senior Researcher of Semiconductor Devices Department,
Research Institute of Semiconductor Devices,
Professor of Department of Radiocommunication Systems,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics
99 a, Krasnoarmejskaja st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: +7 (382-2) 41-33-65
Email: edwardsemyonov@narod.ru

Oleg Yu. Malakhovskij

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Head of Laboratory of Semiconductor Devices Department,
Research Institute of Semiconductor Devices
99 a, Krasnoarmejskaja st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: +7 (382-2) 28-84-92
Email: malakhovskiy_oy@niipp.ru

УДК 53.097

П.Е. Троян, В.И. Зеленский, В.В. Каранский

Импульсные характеристики наноструктур металл–диэлектрик–металл

Рассмотрены импульсные характеристики тонкопленочной наноструктуры на основе пленки оксинитрида кремния, указывающие на мемристорские свойства наноструктуры. Исследованы ВАХ и переключения структур из состояния высокого сопротивления в состояние высокой проводимости в импульсном режиме. Установлено, что переключение высокого сопротивления в высокую проводимость осуществляется за более длительный промежуток времени по сравнению с переключением из высокой проводимости в высокое сопротивление. Между состояниями высокого сопротивления и высокой проводимости возможно состояние с промежуточной проводимостью.

Ключевые слова: тонкопленочная наноструктура, металл–диэлектрик–металл, импульсные характеристики, мемристорские свойства.

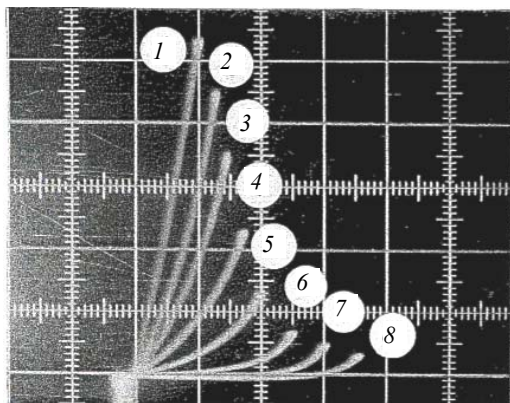
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-17-20

В тонкопленочной наноструктуре металл–диэлектрик–металл (МДМ-структура) в результате воздействия сильного электрического поля с напряженностью более 10^9 В/м наблюдаются такие представляющие интерес для наноэлектроники физические свойства, как эмиссия электронов в вакуум и вольт-амперная характеристика с участком отрицательного дифференциального сопротивления и гистерезисом, характеризующимся двумя состояниями: высокой проводимостью, $0,5 \text{ Ом}^{-1}$ (ВП) и высоким сопротивлением 10^6 – 10^7 Ом (ВС) [1–6].

Интерес к МДМ-структурам в настоящее время обусловлен наличием у них мемристорных свойств и потенциальной возможности разработки мемристорного элемента памяти [7, 8].

В этой связи представляет интерес изучение токопереноса в МДМ-структуре в импульсном режиме [9]. Структура М-Д-М (Al-SiO₂-Al), площадь структуры 1 на 1 мм² получены методом термического испарения при нанесении электродов. Диэлектрик получен магнетронным распылением кремниевой мишени.

На рис. 1 представлены типичные зависимости тока, протекающего между электродами металл–металл МДМ-структуры, от амплитуды напряжения, приложенного к электродам.



По вертикали: 5 мА/дел. По горизонтали: 5 В/дел.

Рис. 1. Вольт-амперная характеристика сквозного тока

Если провести кривую через максимальные значения токов, то огибающая характеристика тока представляет собой зависимость с участком отрицательной дифференциальной проводимости. Значение напряжения V , при котором достигается максимум сквозного тока, составляет 3–4 В.

Семейство динамических вольт-амперных характеристик сквозного тока определяется амплитудной приложенного напряжения V . В случае, если $V < 1$ В, вольт-амперная характеристика близка к линейной. При $V > 1$ В вольт-амперная характеристика имеет вид 1 и максимальное значение тока достигается при значении напряжения V_{\max} . При $V > V_{\max}$ вольт-амперная характеристика имеет вид кривых 2–8, причем амплитуда сквозного тока уменьшается с увеличением амплитуды напряжения.

Переходные характеристики сквозного тока зависят от состояния образца, обусловленного предыдущим воздействием напряжения.

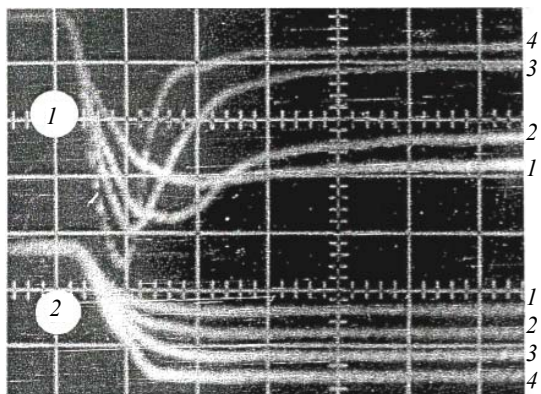
В зависимости от воздействия напряжения образец может находиться либо в состоянии ВП, либо в состоянии ВС (перед исходным состоянием). Исходное состояние образца: высокая проводимость – ВП.

При воздействии импульса напряжения с амплитудой $V < V_{\max}$ форма импульса сквозного тока повторяет форму импульса напряжения. Амплитуда тока зависит от приложенного напряжения в соответствии с динамической вольт-амперной характеристикой (рис. 1, кривая 1). После окончания действия импульса напряжения состояние ВП сохраняется.

При условии $V < V_{\max}$ осциллограммы импульсов сквозного тока имеют вид, показанный на рис. 2.

Максимальное значение амплитуды сквозного тока достигается при $V = V_{\max}$. При $V < V_{\max}$ образец остается в исходном состоянии высокой проводимости (ВП). С дальнейшим увеличением V наблюдается уменьшение проводимости образца, что указывает на переход (переключение) в состояние высокого сопротивления (ВС).

Исходное состояние образца: высокое сопротивление – ВС.

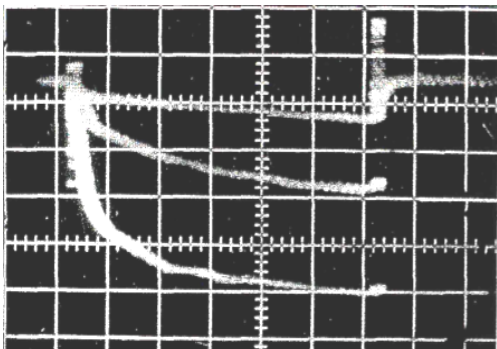


По вертикали: 25 мА/дел.; 2 – 5 В/дел.
По горизонтали: 0,25 мкс/дел.

Рис. 2. Осциллограммы импульсов сквозного тока

При амплитуде напряжения $V < V_S$, где $V_S < V_{max}$ – значение порогового напряжения для данного состояния ВС, исходное состояние сохраняется. При увеличении амплитуды напряжения в интервале $V_S < V < V_{max}$ происходит увеличение амплитуды тока с возрастанием крутизны фронта импульса (рис. 3).

При этом проводимость образца возрастает, что указывает на переход (переключение) в состояние высокой проводимости – ВП. При этом установлено, что скорость переключения ВС–ВП зависит от амплитуды приложенного импульса напряжения и возрастает с увеличением значения V_M . Значение сквозного тока увеличивается с течением времени при неизменной амплитуде приложенного к образцу импульса напряжения (рис. 4). Кроме того, переключение ВС–ВП осуществляется за более длительный промежуток времени по сравнению с переключением ВП–ВС.



По вертикали: 2,5 мА/дел. По горизонтали: 25 мкс/дел.

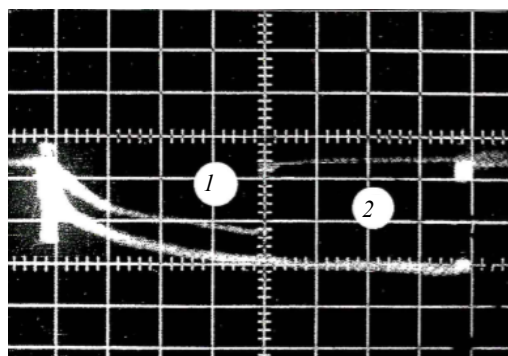
Рис. 3. Осциллограмма импульсов сквозного тока при увеличении амплитуды

При воздействии на образец следующих друг за другом одиночных прямоугольных импульсов, с амплитудой от 0 до 20 В, различной длительностью от 50 до 200 мкс, напряжения одинаковой амплитуды приводят к увеличению тока через образец до некоторого максимального значения (рис. 5).

При воздействии на образец импульса напряжения амплитудой $V > V_{max}$ осциллограмма сквозного тока имеет вид, приведенный на рис. 6.

Значение проводимости образца после воздействия импульса напряжения зависит от амплитуды

импульса напряжения, в результате воздействия которого было получено исходное состояние ВС.



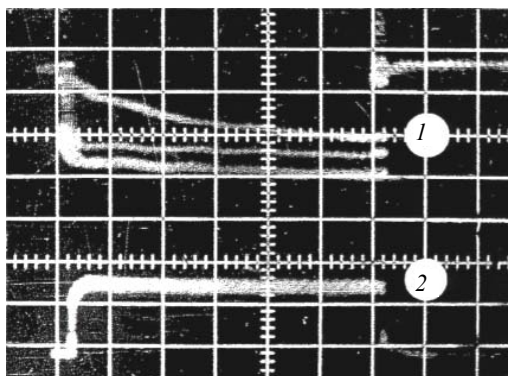
По вертикали: 2,5 мА/дел.

По горизонтали: 1 – мкс/дел.; 2 – 50 мкс/дел.

Рис. 4. Осциллограмма импульса сквозного тока в зависимости от времени

В зависимости от амплитуды воздействия импульса на образец формируется состояние с различным значением проводимости от 10^{-6} до $0,5 \text{ Ом}^{-1}$. Вид промежуточных характеристик зависит от амплитуды воздействующего напряжения на образец.

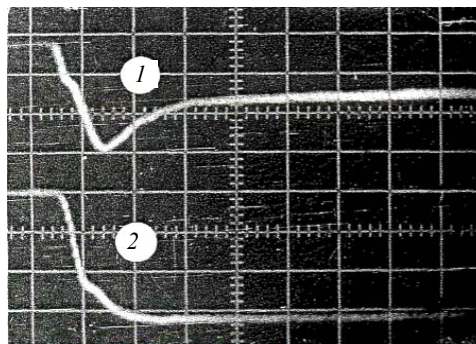
Значение проводимости образца после воздействия импульса напряжения зависит от амплитуды импульса напряжения, в результате воздействия которого было получено исходное состояние ВС.



По вертикали: 1 – 2,5 мА/дел, 2 – 2,5 В/дел.

По горизонтали: 25 мкс/дел.

Рис. 5. Осциллограмма импульса сквозного тока при воздействии напряжения одинаковой амплитуды



По вертикали: 1 – 50 мА/дел, 2 – 2,5 В/дел.

По горизонтали: 0,1 мкс/дел.

Рис. 6. Осциллограмма импульса сквозного тока при воздействии напряжения амплитудой $V > V_{max}$

Особенности динамических вольт-амперных характеристик и переходных характеристик сквозного тока указывают на то, что кроме состояний с высокой проводимостью и высоким сопротивлением возможны состояния с промежуточной проводимостью (сопротивлением).

Для изучения зависимости амплитуды тока от предшествующего воздействия напряжения на образец последовательно подавались два импульса с амплитудами $V_1 > V_{max}$, $V_2 > V_{max}$. И значения амплитуды токов сопоставлялись с семейством вольт-амперных характеристик МДМ-структуры.

При $V_1 = V_2 > V_{max}$ первый и второй импульсы сквозного тока соответствуют кривой на рис. 7. При увеличении амплитуды $V_1 > V_2$ первый импульс сквозного тока соответствует кривой, а второй импульс – участку. При $V_1 < V_{max}$, $V_2 < V_{max}$ амплитуда второго импульса сквозного тока не зависит от первого импульса напряжения.

Как указывается в [10], такие свойства МДМ-структуры, как эмиссия электронов в вакуум, вольт-амперная характеристика сквозного тока, определяются свойствами квантовых точек и нанозора между квантовыми точками (Si), возникающими в процессе электрической формовки, путем диссоциации слабых связей Si-OH Si-H, имеющихся в пленках SiO₂, и участком верхнего электрода (М) (рис. 8) в условиях сильного электрического поля, напряженность составляет 10⁸–10⁹ В/м при напряжении 10–15 В между электродами МДМ-структуры.

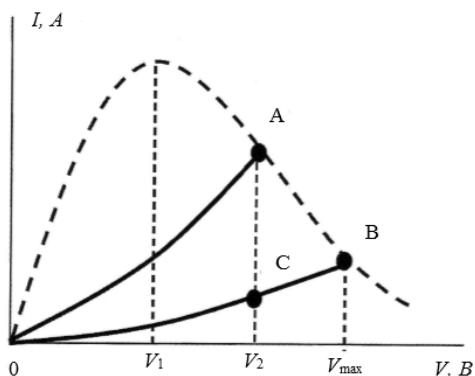


Рис. 7. Зависимость динамической вольт-амперной характеристики сквозного тока от амплитуды предшествующего импульса напряжения

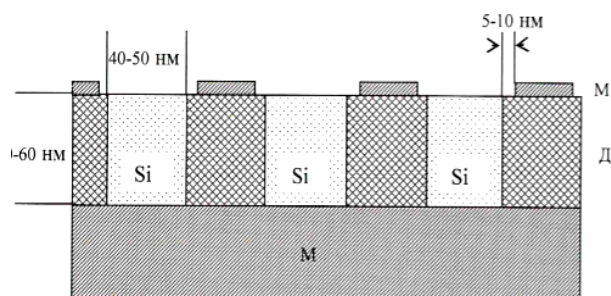


Рис. 8. Модель структуры МДМ, образующейся в результате электрической формовки [11–15]

Полученные результаты позволяют углубить знания в области процессов переключения в МДМ

структурах, в том числе использованных для создания мемристорных элементов памяти. Установлено, что переключение высокого сопротивления в высокую проводимость осуществляется за более длительный промежуток времени по сравнению с переключением из высокой проводимости в высокое сопротивление. Между состояниями высокого сопротивления и высокой проводимости возможно состояние с промежуточной проводимостью.

Литература

1. Дирнлей Дж. Электрические явления в аморфных пленках оксидов / Дж. Дирнлей, А. Стоунхэм, Д. Могран // УФН. – 1974. – Т. 112, вып. 1. – С. 83–128.
2. Баранов А.В. Эмиссия горячих электронов из тонкопленочной системы Al–Si₃N₄–Al / А.В. Баранов, Г.А. Воробьев, П.Е. Троян и др. // Изв. АН СССР. Сер.: физическая. – 1974. – Т. 38, № 2. – С. 291–295.
3. Ray A.K. A critical review of the observed electrical properties MIM devices showing VCNR / A.K. Ray, C.A. Hogarth // Int. J. Electronics. – 1984. – Vol. 57, № 1. – P. 1–78.
4. Мордвинцев В.М. Возможный механизм формирования N-образной вольт-амперной характеристики МПМ диода / В.М. Мордвинцев, В.Л. Левин. – ЖТФ. – 1994. – Т. 64, вып. 12. – С. 88–150.
5. Воробьев Г.А. Электронные процессы в тонкопленочных структурах металл–диэлектрик–металл / Г.А. Воробьев, П.Е. Троян. – Томск, 2007. – 180 с.
6. Pagnia H. Bistable switching in electroformed metal-insulator-metal devices / H. Pagnia, N. Sotnik // Phys. stat. sol (a). – 1988. – Vol. 108, № 11. – P. 11–65.
7. Троян П.Е., Каранский В.В. Электрическая формовка и пробой тонкопленочных структур металл–диэлектрик–металл // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 152–154.
8. Троян П.Е. Электрическая формовка тонкопленочных структур металл–диэлектрик–металл в сильных электрических полях. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. – 178 с.
9. Антоненко П.И. Особенности работы матрицы ненакалываемых тонкопленочных эмиттеров в импульсном режиме / П.И. Антоненко, Г.А. Воробьев, В.И. Зеленский, П.Е. Троян и др. // Электронная техника. – Сер. 4: Электрорадиотехника и газоразрядные приборы. – 1988. – В. 3 (112). – С. 25–26.
10. Троян П.Е. Эмиссионные структуры на основе формованных тонкопленочных систем / П.Е. Троян, В.И. Зеленский // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 4. – С. 9–11.
11. Гапоненко В.М. О природе образования формованных каналов в тонкопленочных МДМ-системах / В.М. Гапоненко // Изв. вузов. Физика. – 1992. – № 5. – С. 115–120.
12. Троян П.Е. Электрическая формовка тонкопленочных МДМ-систем // Изв. вузов. Физика. – 1996. – Т. 39, № 5. – С. 55–60.
13. Barriac C. Study of the electrical properties of Al–Al₂O₃–metal structures / C. Barriac, P. Pinard, and F. Daroigne // Phys. stat. sol (a). – 1974. – Vol. 34, № 1. – P. 621–633.
14. Гапоненко В.М. Влияние напряжения на деградацию формованных каналов в тонкопленочных МДМ-катодах // Изв. вузов. Физика. – 1992. – № 10. – С. 44–47.
15. Воробьев Г.А. Формовка системы металл–диэлектрик–металл и ее пробой / Г.А. Воробьев, В.И. Зеленский // Радиотехника и электроника. – 1989. – Т. 34, № 6. – С. 1312–1315.

Троян Павел Ефимович

Д-р техн. наук, профессор каф.
физической электроники (ФЭ) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-110-22-11
Эл. почта: tpe@tusur.ru

Зеленский Владимир Иванович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. физики
и общетехнических дисциплин
Югорского государственного университета
Чехова ул., д. 16, г. Ханты-Мансийск, Россия, 628012
Тел.: +7 (347-6) 35-75-92
E-mail: w_selenski@ugrasu.ru

Каранский Виталий Владиславович

Аспирант каф. ФЭ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-440-72-78
Эл. почта: karanskii_vitali@mail.ru

Troyan P.E., Zelensky V.I., Karansky V.V.

Impulse characteristics nanostructures of metal-dielectric-metal

Pulsed characteristics of a thin-film nanostructure based on a silicon oxynitride film point out memristor properties of the nanostructure, are considered. The current-voltage characteristics and switching of structures from a state of high resistance to a state of high conductivity in a pulsed mode are investigated. It is established that the switching of high resistance to high conductivity is carried out for a longer period of time compared with switching from high conductivity to high resistance. Between states of high resistance and high conductivity, a state with intermediate conductivity is possible.

Keywords: thin-film nanostructure, metal-insulator-metal, impulse response, memristor properties.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-17-20

References

1. Dimlei Dj., Stounhem A., Mogran D. Elektricheskie yavleniya v amorfnih plenkah oksidov. *UFN*, 1974, T. 112, VIP. 1, pp. 83–128 (in Russ.).
2. Baranov A.V., Vorobev G.A., Troyan P.E. i dr. Emis-siya goryachih elektronov iz tonkopenochnoi sistemi Al-Si₃N₄-Al. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Fizicheskaya*, 1974, T. 38, no. 2, pp. 291–295 (in Russ.).
3. Ray A.K., Hogarth C.A. A critical review of the observed electrical properties MIM devices showing VCNR. *Int. J. Electronics*, 1984, vol. 57, no. 1, pp. 1–78.
4. Mordvincev V.M., Levin V.L. Vozmozhnii mehanizm formirovaniya N-obraznoi volt-ampernoï harakteristiki MPM diode, *JTF*, 1994, T. 64, vol. 12, pp. 88–150 (in Russ.).
5. Vorobev G.A., Troyan P.E. Elektronnie processi v tonkopenochnih strukturah metal-dielektrik-metall, *Monografiya, Tomsk*, 2007. 180 p.
6. Pagnia H., Sotnik N. Bistabile switching in electro-formed metal-insulator-metal devices. *Phis. stat. sol (a)*, 1988, vol. 108, no. 11, pp. 11–65 (in Russ.).

7. Troyan P.E., Karanskii V.V. Elektricheskaya formovka i proboi tonkopenochnih struktur metall-dielektrik-metall. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, T. 20, no. 3, pp. 152–154 (in Russ.).

8. Troyan P.E. Elektricheskaya formovka tonkopenochnih struktur metall – dielektrik – metall v silnih elektricheskikh polyah. *Tomsk, izd-vo Tomskogo universiteta*, 2003. 178 p. (in Russ.).

9. Vorobev G.A., Zelenskii V.I., Troyan P.E., Antonenko P.I. i dr. Osobennosti raboti matrici nenakalivaemih tonkople_nochnih emitterov v impulsnom rejime. *Elektronnaya tehnika (Elektrovakuunnie i gazorazryadnie pribori)*, 1988, vol. 3, 112, pp. 25–26 (in Russ.).

10. Troyan P.E., Zelenskii V.I. Emissionnie strukturi na osnove formovannih tonkopenochnih system. *Nano- i mikro-sistemnaya tehnika*, 2013, no. 4, pp. 9–11 (in Russ.).

11. Gaponenko V.M. O prirode obrazovaniya formovannih kanalov v tonkopenochnih MDM sistemah. *Izv. Vuzov. Fizika*, 1992, no. 5, pp. 115–120 (in Russ.).

12. Troyan P.E. Elektricheskaya formovka tonkopenochnih MDM system. *Izv. Vuzov. Fizika*, 1996, T. 39, no. 5, pp. 55–60 (in Russ.).

13. Barriac C., Pinard P., Daroïne F. Study of the electrical properties of Al-Al₂O₃-metal structures. *Phis. state, sol (a)*, 1974, vol. 34, no. 1, pp. 621–633.

14. Gaponenko V.M. Vliyanie napryajeniya na degradaciyu formovannih kanalov v tonkopenochnih MDM-katodah. *Izv. vuzov. Fizika*, 1992, no. 10, pp. 44–47 (in Russ.).

15. Vorobev G.A., Zelenskii V.I. Formovka sistemi metall-dielektrik-metall i ee proboi. *Radiotekhnika i elektronika*, 1989, T. 34, no. 6, pp. 1312–1315 (in Russ.).

Pavel E. Troyan

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Physical Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-110-22-11
Email: tpe@tusur.ru

Vladimir I. Zelensky

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics and General Technical Disciplines, Ugra State University 16, Chekhov st., Khanty-Mansiysk, Russia, 628012
Phone: +7 (347-6) 35 75 92
Email: w_selenski@ugrasu.ru

Vitaly V. Karansky

PhD student, Department of Physical Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-440-72-78

УДК 621.37

А.В. Филатов

Модель входного устройства радиометрического приемника для измерения профиля глубинных температур биологических сред методом неинвазивной радиотермометрии

Рассмотрена модель входного блока микроволнового радиометрического приемника для дистанционных измерений температуры в глубине биологической среды неинвазивным способом, в которой применен ответвитель на связанных линиях передачи. Ответвление части высокочастотного сигнала генератора шума происходит из основного канала в оба рабочих плеча вторичного канала с различными значениями коэффициентов переходного ослабления, разность которых определяет размах диапазона измерения. Это позволяет на стадии моделирования параметров ответвителя создавать радиотермометры с заданными диапазонами измерений. Использование в основе функционирования модели модифицированного метода нулевого приема позволяет снизить влияние на измерения коэффициента отражения в месте приложения аппликаторной антенны к телу и повысить динамические характеристики при картировании биологического объекта.

Ключевые слова: неинвазивный метод радиотермометрии, микроволновая радиотермометрия, измерение глубинных температур биологических сред.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-21-27

В медицинской диагностике при дистанционных измерениях глубинной температуры биологических объектов неинвазивным способом применение микроволновых радиометров имеет неоспоримые преимущества перед инвазивными методами, заключающимися в непосредственном введении в тело объекта миниатюрных термодатчиков, например термопар. К достоинствам радиоволнового метода можно отнести бескровность, раннюю диагностику заболеваний; контроль за ходом лечения (метод безвреден для пациентов, измерения могут повторяться неоднократно), уникальную способность обнаруживать быстрорастущие опухоли (удельное тепловыделение в опухоли прямо пропорционально скорости ее роста).

В настоящее время применяемые в медицинских измерениях радиотермометры [1–7], в основе функционирования которых используется нулевой метод, имеют основной недостаток – низкое быстродействие (измерение в одной точке составляет около 20 с), что значительно снижает возможности радиометрического метода, например по сканированию объекта в ходе его радиотеплового картирования. В таких радиотермометрах состояние нулевого приема достигается в ходе нагрева–охлаждения опорной согласованной нагрузки, шумовая температура которой выравнивается с шумовой температурой антенны. Тепловая инерция снижает динамические свойства приемной радиометрической системы. Во входных блоках известных радиотермометров установлен циркулятор, работающий в режиме вентиля. Ферритовые вентили относятся к дорогостоящим изделиям сверхвысокочастотной (СВЧ) техники. Кроме того, имеют достаточно узкую полосу частот, что для радиометрических измерений является крайне нежелательным, а возникающие в них потери при прохождении сигнала дополнительно ухудшают точность.

В данной работе рассмотрена модель входного блока радиотермометра для дистанционного определения температуры в глубине биологического объекта радиометрическим методом без использования в нем вентиляльного устройства, содержащая канал формирования подшумливающего объект сигнала для реализации нулевого метода измерений. Подшумливание объекта осуществляется импульсами, длительность которых зависит от величины сигнала от объекта. Для этого во входном устройстве осуществляется дополнительно к амплитудно-импульсной модуляции широтно-импульсная. Достоинством такой схемы перед известными является более высокое быстродействие. Регулировка нулевого баланса осуществляется по модифицированному методу нулевого приема [8, 9] и заключается не в изменении опорного шумового сигнала до совпадения с входным сигналом, а в изменении времени поступления этого сигнала в измерительный тракт. Электромагнитный сигнал от объекта, непосредственно несущий информацию о глубинной температуре, определяется косвенным образом через длительность широтно-импульсного сигнала, и на этот сигнал не влияет коэффициент отражения в месте приложения аппликаторной антенны к объекту.

В составе модели входного блока используется ответвитель, представляющий собой две линии передачи с распределенной электромагнитной связью и с различными значениями переходного ослабления при ответвлении сигнала из основного (первичного) канала во вспомогательный (вторичный) канал в прямом и противоположном направлениях, т.е., когда возбуждаются оба выходных плеча вторичного канала ответвителя.

На рис. 1 приведена структурная схема модели входного блока, включающего антенну аппликаторного типа А, сверхвысокочастотный ключ Кл, ответвитель, в основной канал которого через переключатель ПК поступает сигнал генератора шума ГШ для

подшумливания объекта исследования. В канале формирования подшумливающего сигнала также установлены две согласованные нагрузки CH_1 и

CH_2 . Сигнал с выхода ответвителя поступает на радиометрический приемник, собственная шумовая температура которого равна $T_{ш}$.

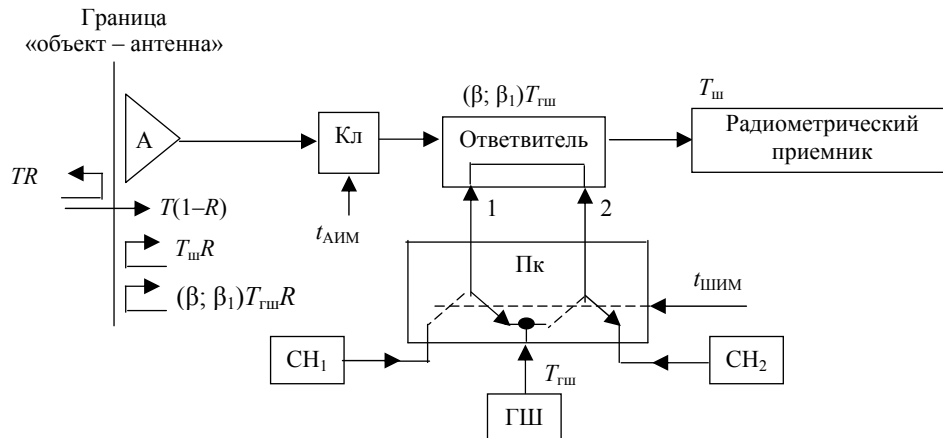


Рис. 1. Структурная схема входного блока

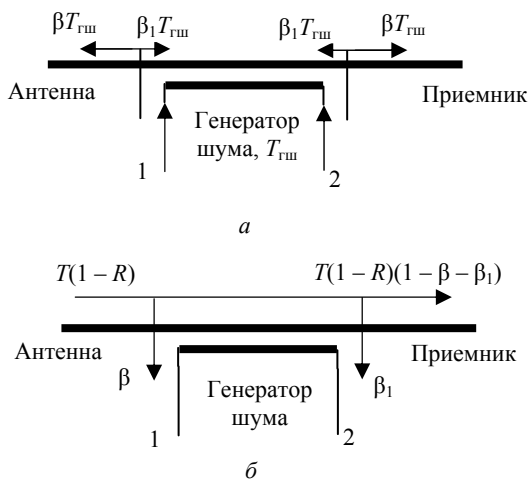


Рис. 2. Схемы направлений распространения сигналов во вспомогательном канале ответвителя:
 а – при поступлении сигнала генератора шума на различные входы основного канала;
 б – при ответвлении части полезного сигнала антенны в основной канал

Возникающее в толще объекта электромагнитное излучение характеризуется эффективной шумовой температурой T , которая непосредственно определяет его интегральную по глубине термодинамическую температуру. В месте приложения аппликаторной антенны часть этого излучения, равная TR , отражается обратно в объект, где R – коэффициент отражения по мощности на границе антенны с объектом. Другая часть, $T(1-R)$, принимается антенной и является для радиометрического приемника входным сигналом.

Во входном блоке осуществляются два вида импульсных модуляций: амплитудная и широтная. Амплитудно-импульсная модуляция сигнала антенны выполняется в СВЧ-ключе по меандровому сигналу. Для этого поступающие на вход управления ключом импульсы длительностью $t_{АИМ}$ следуют со скважностью 2. Широтно-импульсной моду-

ляции подвергается сигнал генератора в канале подшумливания. Модуляция осуществляется по управляющему сигналу длительностью $t_{ШИМ}$ и заключается в переключении входных плеч основного канала ответвителя. На рис. 2, а показана схема направлений распространения сигналов во вспомогательном канале ответвителя при поступлении высокочастотного сигнала генератора шума с эффективной температурой шумов $T_{гш}$ на различные входы основного канала. При питании входного плеча 1 основного канала, поступающая во вспомогательный канал часть сигнала генератора шума, равная $\beta T_{гш}$, распространяется в сторону антенны, другая часть, $\beta_1 T_{гш}$, – в сторону входа приемника, где β и β_1 – значения переходного ослабления связанных линий, для которых во всей полосе принимаемых частот выполняется условие $\beta_1 < \beta < 1$. Аналогичным образом, если сигнал генератора шума поступает во входное плечо 2 основного канала ответвителя, то его часть, равная $\beta T_{гш}$, распространяется в сторону радиометрического приемника, а другая часть, $\beta_1 T_{гш}$, – в сторону антенны.

Принцип работы заключается в следующем. Во входном блоке по управляющему сигналу $t_{АИМ}$ замыкается высокочастотный ключ и сигнал антенны поступает на вход приемника (рис. 3). При замкнутом ключе синхронно с амплитудно-импульсной модуляцией осуществляется широтно-импульсная по сигналу $t_{ШИМ}$. В первом полупериоде амплитудно-импульсной модуляции, в начале импульса длительностью $t_{АИМ}$, до появления сигнала управления широтной модуляцией, в переключателе выход генератора шума скоммутирован на первый вход основного канала ответвителя. В результате большая часть этого сигнала ($\beta T_{гш}$) через СВЧ-ключ поступает в антенну, и отражаясь на границе с объектом, возвращается на вход приемника. Меньшая часть сигнала генератора шума ($\beta_1 T_{гш}$), поступая во вторичный канал ответвителя, непосредственно распространяется в сторону при-

емника. При появлении импульса $t_{\text{ШИМ}}$ происходит переключение входов основного канала ответвителя, они меняются местами. От генератора запитывается вход 2, соответственно, большая часть сигнала генератора шума поступает на вход приемника, меньшая – передается в сторону антенны.

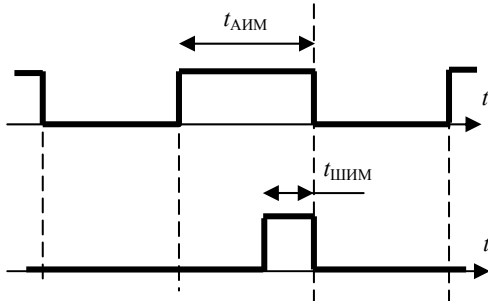


Рис. 3. Временные диаграммы управляющих сигналов амплитудно-импульсной и широтно-импульсной модуляциями

Во втором полупериоде амплитудно-импульсной модуляции, когда импульсный сигнал $t_{\text{АИМ}}$ отсутствует, ключ во входном блоке размыкается. В этом полупериоде импульсный сигнал управления широтной модуляцией не вырабатывается и сигнал генератора шума в течение всего полупериода поступает во входное плечо 1 основного канала ответвителя.

Таким образом, в зависимости от комбинации управляющих модуляциями сигналов на входе линейного приемника имеют место три сигнала, пропорциональных соответствующим шумовым температурам:

– сигнал А:

$$T(1 - R) + T_{\text{гш}}\beta + T_{\text{гш}}\beta_1 R + T_{\text{ш}} R + T_{\text{ш}}, \quad (1)$$

– сигнал В:

$$T(1 - R) + T_{\text{гш}}\beta R + T_{\text{гш}}\beta_1 + T_{\text{ш}} R + T_{\text{ш}}, \quad (2)$$

– сигнал С:

$$T_{\text{гш}}\beta + T_{\text{гш}}\beta_1 + T_{\text{ш}} + T_{\text{ш}} = T_{\text{гш}}(\beta - \beta_1) + 2T_{\text{ш}}. \quad (3)$$

Входящие в формулы (1)–(3) эффективные температуры принадлежат различным шумовым источникам, являются некоррелированными и их мощности складываются (шумовая температура является энергетическим параметром поступающего в антенну электромагнитного излучения). В формулах не представлен интерференционный член от взаимодействия собственных шумов приемника и этих же шумов, прошедших через измерительный тракт входного блока и отраженных от антенны. Условием его отсутствия является выполнение требования для минимальной длины волноведущих линий, которая находится из следующего равенства: $s_{\text{мин}} = c/(2\Delta f\sqrt{\epsilon})$, где c – скорость света в вакууме, ϵ – диэлектрическая проницаемость подложки, на которой размещаются пассивные элементы входного узла, Δf – полоса принимаемых частот.

В основе функционирования радиотермометра используется модифицированный нулевой метод [9]. Как следует из [10, 11], для данной модификации математическая модель, через которую косвенно определяется измеряемый сигнал антенны через длительность импульса, управляющего широтно-импульсной модуляцией, имеет вид

$$t_{\text{ШИМ}} = \frac{C - B}{A - B} t_{\text{АИМ}}, \quad (4)$$

где A, B, C – значения сигналов из (1)–(3). После подстановки этих значений в (4) и простых преобразований получим

$$t_{\text{ШИМ}} = \frac{T_{\text{ш}} + T_{\text{гш}}\beta - T}{T_{\text{гш}}(\beta - \beta_1)} t_{\text{АИМ}}. \quad (5)$$

Из (5) выразим определяемый сигнал объекта исследований

$$T = T_{\text{ш}} + T_{\text{гш}}\beta - T_{\text{гш}}(\beta - \beta_1) \frac{t_{\text{ШИМ}}}{t_{\text{АИМ}}}. \quad (6)$$

Для крайних значений длительности $t_{\text{ШИМ}}$ определяем границы диапазона измерений

$$T_{\text{макс}} = T_{\text{ш}} + T_{\text{гш}}\beta \quad (t_{\text{ШИМ}} = 0), \quad (7)$$

$$T_{\text{мин}} = T_{\text{ш}} + T_{\text{гш}}\beta_1 \quad (t_{\text{ШИМ}} = t_{\text{АИМ}}). \quad (8)$$

Размах диапазона измерений соответственно составляет величину

$$dT = T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}} = T_{\text{гш}}(\beta - \beta_1). \quad (9)$$

Из (7)–(9) следует, что необходимый диапазон измерений можно устанавливать не соответствующим изменением эффективных температур опорных источников шума, в частности, согласованной нагрузки вентиля, как это выполнено в [6], а изменением параметров ответвителя, изменяя значения переходного ослабления при передаче сигнала генератора шума из основного канала в выходные плечи вторичного канала. То есть, задача изменения границ диапазона измерений является параметрической и заключается в изменении геометрических размеров ответвителя, обеспечивающих в заданной полосе частот необходимые значения переходного ослабления. На рис. 4 приведена диаграмма диапазона измерения, из которой наглядно следует возможность настройки диапазона на выбранные границы изменением значений коэффициентов переходного ослабления β и β_1 в процессе проектирования ответвителя. При увеличении β_1 диапазон измерений сужается и при $\beta = \beta_1$, когда равные мощности сигнала генератора шума ответвляются в различных направлениях, сольется в точку.

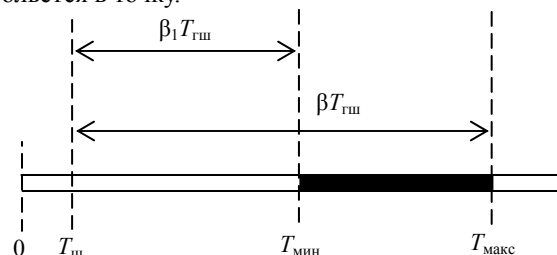


Рис. 4. Диаграмма диапазона измерения

Изменения значений переходного ослабления β и β_1 ответвителя можно выполнить варьированием длины области связи линий передачи и изменением зазора между ними. На рис. 5 приведен график изменения переходного ослабления β^* в связанных полосковых линиях передачи, расположенных на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью 10, при изменении зазора между ними от 1 до 3 мм. График получен для частоты 3 ГГц в результате моделирования ответвителя в программной среде Microwave Office. На этом графике значения β^* были получены для таких длин связанных линий, при которых поступающие сигналы в оба плеча вспомогательного канала одинаковы, т.е. когда выполняется условие равенства значений переходного ослабления $\beta = \beta_1$.

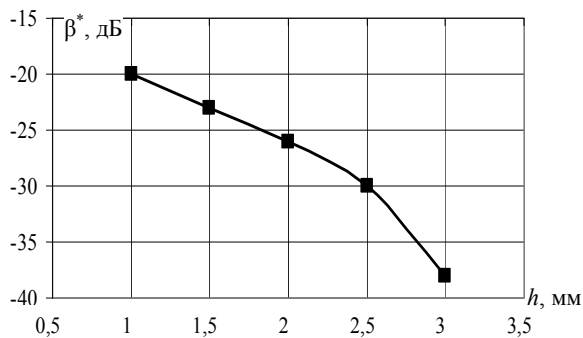


Рис. 5. Изменение переходного ослабления в связанных линиях передачи от зазора между ними (микростриповые линии с лицевой связью, расположенные на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью 10)

При исследовании биологических сред наибольший интерес представляют температуры, находящиеся, как правило, в границах $\sim 20\text{--}50^\circ\text{C}$, что в термодинамических температурах составляет $\sim 295\text{--}325\text{ K}$ [12–15]. С позиции радиометрических измерительных систем данный диапазон можно классифицировать как узкий. С учетом этого рассмотрим последовательность определения геометрических характеристик ответвителя для заданных минимальной $T_{\text{мин}}$ и максимальной $T_{\text{макс}}$ границ измерительного диапазона.

В качестве исходной информации для моделирования вначале выбирается значение переходного ослабления β^* ответвителя в диапазоне от -20 до -35 дБ. Предпочтение следует отдавать более слабой связи между линиями, чтобы минимизировать ответвление сигнала из вспомогательного канала в основной и тем самым минимизировать потери полезного антенного сигнала при его прохождении через ответвитель (влияние величины переходного ослабления на точность измерений будет рассмотрено ниже). Для выбранного β^* определяется зазор между линиями. Например, для частоты 3 ГГц можно воспользоваться графиком на рис. 5 (аналогичные графики можно построить и для других частот).

После выбора зазора между связанными линиями, дальнейшее моделирование параметров

ответвителя производится изменением размеров области связи линий передачи с использованием метода подбора. Для узкого диапазона измерений параметры β и β_1 имеют близкие значения, поэтому определение размеров начинается от длины, которая соответствует выбранному значению β^* , когда выполняется равенство $\beta = \beta_1$ (в этой точке осуществляется смена режима работы ответвителя, когда он переходит из противонаправленного режима в сонаправленный). Уменьшение длины связанных линий выполняется с шагом 0,01 мм. На каждом шаге с использованием программной среды моделирования определяется пара значений переходного ослабления β и β_1 . На этом же шаге для известной эффективной температуры $T_{\text{ш}}$ собственных шумов приемника в ходе расчета находится значение $\beta_{1,\text{расч}}$ по формуле, полученной из совместного решения уравнений (7) и (8):

$$\beta_{1,\text{расч}} = \frac{T_{\text{мин}} - T_{\text{ш}}}{T_{\text{макс}} - T_{\text{ш}}} \beta. \quad (10)$$

Подстановкой в (10) полученного из программы значения β определяется $\beta_{1,\text{расч}}$ и сравнивается с полученным в программе значением β_1 . Если $\beta_1 > \beta_{1,\text{расч}}$, переходят к следующему шагу изменения длины связанных линий, и выше приведенные операции повторяются. Если $\beta_1 \approx \beta_{1,\text{расч}}$, на этом процесс моделирования ответвителя завершается.

По данному алгоритму был смоделирован ответвитель на частоту 3 ГГц для согласованного основного канала. Ответвитель проектировался для диапазона измеряемых температур $295\text{--}325\text{ K}$ и собственных шумов с эффективной температурой 70 К. Для полученных значений переходного ослабления $\beta = -26,05$ дБ, $\beta_1 = -26,68$ дБ, длина связанных линий составила 13,42 мм при зазоре между ними 2,04 мм.

Ответвитель относится к взаимному реактивному устройству, поэтому в нем происходит не только передача электромагнитной энергии из основного канала во вспомогательный, но и отбор некоторой части распространяющегося во вспомогательном канале высокочастотного сигнала в основной. На рис. 2, б приведена схема направлений ответвления сигнала антенны из вспомогательного канала в основной. На входе приемника измеряемый сигнал уменьшается на величину, пропорциональную $1 - \beta - \beta_1$. То же самое имеет место и для других сигналов, распространяющихся в обоих направлениях. В этом случае уровни сформированных во входном блоке сигналов будут отличаться от (1)–(3) и соответственно равны:

– сигнал А:

$$T(1-R)(1-\beta-\beta_1) + T_{\text{гш}}\beta + T_{\text{гш}}\beta_1 R(1-\beta-\beta_1) + T_{\text{ш}}R(1-\beta-\beta_1)^2 + T_{\text{ш}},$$

– сигнал В:

$$T(1-R)(1-\beta-\beta_1) + T_{\text{гш}}\beta R(1-\beta-\beta_1) + T_{\text{гш}}\beta_1 + T_{\text{ш}}R(1-\beta-\beta_1)^2 + T_{\text{ш}},$$

– сигнал С:

$$T_{гш}\beta(1-\beta-\beta_1)+T_{гш}\beta_1+T_{УВЧ}(1-\beta-\beta_1)^2+T_{ш}.$$

Проведя аналогичные выше приведенным преобразования, получим выражения для определения длительности широтно-импульсного сигнала и входного сигнала:

$$t_{ШИМ} = (1-R)\gamma \frac{T_{ш}\gamma + T_{гш}\beta - T}{T_{гш}(\beta - \beta_1)(1-R\gamma)} t_{АИМ}, \quad (11)$$

$$T = T_{ш}\gamma + T_{гш}\beta - T_{гш}(\beta - \beta_1) \frac{1-R\gamma}{(1-R)\gamma} \frac{t_{ШИМ}}{t_{АИМ}}, \quad (12)$$

где $\gamma = 1 - \beta - \beta_1$.

Максимальная $T_{макс}$ и минимальная $T_{мин}$ границы диапазона измерений соответственно определяются из (12) для $t_{ШИМ} = 0$ и $t_{ШИМ} = t_{АИМ}$:

$$T_{макс} = T_{ш}\gamma + T_{гш}\beta, \quad (13)$$

$$T_{мин} = T_{ш}\gamma + T_{гш}\beta - T_{гш}(\beta - \beta_1) \frac{1-R\gamma}{(1-R)\gamma}. \quad (14)$$

В соотношениях (13), (14) конечное значение отвлечения части сигнала из вторичного канала в первичный непосредственно связано с величиной $1 - \beta - \beta_1$. Если данным отвлечением сигналов пренебречь, т.е. $1 - \beta - \beta_1 \approx 1$, то в этом случае получим (7) и (8).

Рассмотрим влияние вторичного канала ответвителя на первичный и возникающие при этом погрешности. Для этого вычитанием (12) из (6) определим величину абсолютной погрешности:

$$\delta T = T_{ш}(\beta + \beta_1) + T_{гш}(\beta - \beta_1) \frac{\beta + \beta_1}{(1-R)\gamma} \frac{t_{ШИМ}}{t_{АИМ}}. \quad (15)$$

Из полученной формулы (15) следует, что абсолютная погрешность зависит от длительности $t_{ШИМ}$ и при $t_{ШИМ} = t_{АИМ}$ принимает максимальное значение, соответствующее нижней границе диапазона измерений:

$$\delta T_{макс} = (\beta + \beta_1) \left(T_{ш} + \frac{T_{гш}(\beta - \beta_1)}{(1-R)\gamma} \right). \quad (16)$$

По формуле (16) можно оценить погрешность для известных значений шумовых температур радиометрического приемника, генератора шума, учитывая коэффициенты переходного ослабления сигналов в ответвителе и отражения на границе антенны с объектом. С другой стороны, из этой формулы можно найти такие значения переходного ослабления между связанными линиями, для которых погрешность не выходила бы за заданный предел, определяемый $\Delta T_{макс}$. Для этого решим равенство (16) относительно коэффициентов переходного ослабления, принимая во внимание, что различия между их значениями имеют небольшую величину и можно считать, что $\beta = \beta_1 = \beta^*$. Учитывая выражение (9), получим, что значение переходного ослабления должно удовлетворять следующему неравенству:

$$\beta^* \leq \frac{\delta T_{макс}}{2(\delta T_{макс} + T_{ш} + \frac{T_{макс} - T_{мин}}{1-R})}. \quad (17)$$

В (17) входит коэффициент отражения R на границе антенны с объектом. При измерениях значение коэффициента зависит от многих факторов, таких как диэлектрическая проницаемость биологического объекта в месте приложения аппликаторной антенны, качество контакта и т.д., т.е. относится к трудно учитываемым параметрам. Его величина может варьироваться в широких пределах и при каждом измерении может принимать различные значения. В частности, при исследовании биологических сред R , как правило, изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,5. Из (17) следует, что чем больше коэффициент отражения, тем меньше значение β^* необходимо выбирать, чтобы обеспечить заданную точность. После подстановки в (17) $R = 0,5$ получим окончательное выражение для определения переходного ослабления β^* , которое задается в качестве исходной информации в начале моделирования ответвителя:

$$\beta^* \leq \frac{\delta T_{макс}}{2(\delta T_{макс} + T_{ш}) + 4(T_{макс} - T_{мин})}. \quad (18)$$

Если β^* будет удовлетворять неравенству (18), тогда влиянием погрешности, возникающей в результате передачи сигналов из вспомогательного канала в основной, можно пренебречь.

При моделировании данного блока номинальная выходная мощность генератора шума, выраженная в значениях эффективной шумовой температуры, определяется по формуле, полученной из совместного решения выражений (7), (8):

$$T_{гш} = \frac{T_{макс} - T_{мин}}{\beta - \beta_1}. \quad (19)$$

После подстановки в (19) полученных выше значений переходного ослабления ответвителя выходной сигнал генератора шума составил величину 10^5 К.

Таким образом, если в радиотермометре с установленным на входе вентильным устройством границы диапазона измерений определяет термодинамическая температура согласованной нагрузки и изменения границ можно осуществить только ее нагревом или охлаждением, что требует времени и определенных энергетических затрат, в радиотермометре с данным входным блоком этот недостаток отсутствует, так как изменение нижней и верхней границ можно выполнить соответствующим изменением характеристик ответвителя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-07-04971)

Литература

1. Barrett A. Detection of breast cancer by microwave radiometre / A. Barrett, P.C. Myers, N.L. Sadowsky // RadioSci. – 1977. – Vol. 12, № 68. – P. 167–171.
2. О возможности диагностики рака молочной железы путем измерения собственного электромагнитного излучения тканей (радиотермометрии) / Л.М. Бурдина, А.В. Вайсблат, С.Г. Веснин, Н.Н. Тихомирова // Маммология. – 1997. – № 2. – С. 17–22.

3. Klemetsen Q. Design of medical radiometer front-end for improved performance / Q. Klemetsen, Y. Birkelund, S.K. Jacobsen, P.F. Maccarini, P.R. Stauffer // *Progress In Electromagnetics Research B*. – 2011. – Vol. 27. – P. 289–306.

4. Asimakis N.P. Non-invasive microwave radiometric system for intracranial applications. A study using the conformal L-notch microstrip patch antenna / N.P. Asimakis, I.S. Karanasiou, N.K. Uzunoglu // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2011. – Vol. 117. – P. 83–101.

5. Годик Э.Э. Человек «глазами радиофизики» / Э.Э. Годик, Ю.В. Гуляев // *Радиотехника*. – 1991. – № 8. – С. 51–62.

6. Вайсблат А.В. Медицинский радиотермометр РТМ-01-РЭС // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. – 2001. – № 8. – С. 3–9.

7. Маречек С.В. Влияние структуры биоткани на результаты СВЧ-термометрических измерений / С.В. Маречек, В.М. Поляков // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2001. – № 11. – С. 21–30.

8. Filatov A.V. Application Concept of Zero Method Measurement in Microwave Radiometers // *Modern Instrumentation*. – 2015. – Vol. 4, No. 3. – P. 19–31. – doi: 10.4236/mi.2015.43003

9. Филатов А.В. Нулевой метод в радиометрических измерениях. – Томск: ТУСУР, 2010. – 206 с.

10. Филатов А.В. Новый подход к построению радиотехнических СВЧ-устройств пассивной локализации на принципе синхронного совмещения двух видов импульсной модуляции // *Доклады ТУСУР*. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 20–26.

11. Filatov A.V. A Microwave Radio Thermometer for Measuring the Depth Temperatures of Biological Objects by a Noninvasive Method / A.V. Filatov, A.G. Lekhanov // *Measurement Techniques*. – 2015. – Vol. 58, No. 4. – P. 438–445. – doi: 10.1007/s11018-015-0731-1

12. Филатов А.В. Приемный блок нулевого модифицированного микроволнового радиометра для исследования объектов в ближней зоне антенны // *Приборы и техника эксперимента*. – 2015. – № 1. – С. 82–86.

13. Filatov A.V. A New Principle for Construction of Microwave Multireceiver Radiometers Using a Modified Method of Zero Measurement // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2016. – Vol. 59, No. 5. – P. 382–392. – DOI: 10.1007/s11141-016-9707-5

14. Filatov A.V. A Microwave Radiometer for Deep Noninvasive Diagnostics of Thermal Fields Inside a Biological Object / A.V. Filatov, B.V. Utkin, S.E. Tarasov, S.R. Gazitov, M.N. Anishin // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2017. – Vol. 60, No. 3. – P. 367–371. – doi: 10.1134/S002044121703006X

15. Филатов А.В. Новый принцип построения высокочувствительных микроволновых радиометров по многоприемниковой схеме с применением нулевого метода измерений // *Физические основы приборостроения*. – 2017. – Т. 6, № 2 (24). – С. 67–75.

Filatov A.V.

Model of the input device of the radiometric receiver for measuring the profile of the deep temperatures of biological media by non-invasive radio thermometry

A model of the input unit of a microwave radiometric receiver is considered for remote temperature measurements in the depth of the biological environment in a non-invasive way, in which a coupler is used on connected transmission lines. The branch of a part of the high-frequency signal of the noise generator comes from the main channel to both working arms of the secondary channel with different values of the transient attenuation coefficients, the difference of which determines the span of the measurement range. This allows to create radio thermometers with specified measurement ranges at the stage of modeling the parameters of the coupler. Using the model of the modified zero-reception method at the basis of the functioning allows reducing the influence on the measurements of the reflection coefficient at the place of application of the applicator antenna to the body and increasing the dynamic characteristics when mapping a biological object.

Keywords: non-invasive method of radio thermometry, microwave radiothermometry, measurement of deep temperatures of biological media.

Doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-21-27

References

1. Barrett A., Myers P.C., Sadowsky N.L. Detection of breast cancer by microwave radiometre. *RadioSci*, 1977, vol. 12, no. 68, pp. 167–171.

2. Byrdina L.M., Vaisblat A.V., Vesnin S.G., Tixomirova N.N. On the possibility of diagnosing breast cancer by measuring the tissue's own electromagnetic radiation (radio thermometry). *Mammalogy*, 1997, no. 2, pp. 17–22 (in Russ.).

3. Klemetsen Q., Birkelund Y., Jacobsen S.K., Maccarini P.F., Stauffer P.R. Design of medical radiometer front-end for improved performance. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2011, vol. 27, pp. 289–306.

4. Asimakis N.P., Karanasiou I.S., Uzunoglu N.K. Non-invasive microwave radiometric system for intracranial applications. A study using the conformal L-notch microstrip patch antenna. *Progress In Electromagnetics Research*, 2011, vol. 117, pp. 83–101.

5. Godik J.J., Gyliyev Y.V. Man "through the eyes of radiophysics". *Radioengineering*, 1991, no. 8, pp. 51–62 (in Russ.).

6. Vaisblat A.V. Medical radiometer RTM-01-RES. *Biomedical technology and electronics*, 2001, no. 8, pp. 3–9 (in Russ.).

7. Marechek S.V. Polykov V.M. The influence of the structure of biological tissue on the results of microwave thermometric measurements. *Successes of modern radio electronics*, 2001, no. 11, pp. 21–30 (in Russ.).

8. Filatov A.V. Application Concept of Zero Method Measurement in Microwave Radiometers. *Modern Instrumentation*, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 19–31.

9. Filatov A.V. *Zero method in radiometric measurements* [Zero method in radiometric measurements]. Tomsk, TUSUR Publ., 2010. 206 p.

10. Filatov A.V. A new approach to the construction of radio microwave devices, passive location on the principle of synchronous combination of two types of pulse modulation. *TUSUR reports*, 2011, no. 2(24), ch. 3, pp. 20–26 (in Russ.).

Филатов Александр Владимирович

Д-р техн. наук, профессор каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-899-96-41
Эл. почта: filsash@mail.ru

11. Filatov A.V., Lekhanov A.G. A Microwave Radio Thermometer for Measuring the Depth Temperatures of Biological Objects by a Noninvasive Method. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 438–445.

12. Filatov A.V. Receiving unit of zero modified microwave radiometer for examining objects in the near zone of the antenna. *Instruments and Experimental Technique*, 2015, no. 1, pp. 82–86 (in Russ.).

13. Filatov A.V. A New Principle for Construction of Microwave Multireceiver Radiometers Using a Modified Method of Zero Measurement. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2016, vol. 59, no. 5, pp. 382–392.

14. Filatov A.V., Utkin B.V., Tarasov S.E., Gazitov S.R., Anishin M.N. A Microwave Radiometer for Deep Noninvasive Diagnostics of Thermal Fields Inside a Biological Object // *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 367–371.

15. Filatov A.V. A new principle of building highly sensitive microwave radiometers using a multi-receiver circuit using the zero measurement method. *Physical Foundations of Instrument Engineering*, 2017, no. 2 (24), pp. 67–75.

Alexander V. Filatov

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Telecommunications
and Basic Principles of Radio Engineering,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 51-05-30
Email: filsash@mail.ru

УДК 621.382.032.27

С.В. Ишуткин, В.С. Арыков, Ю.С. Жидик, П.Е. Троян

Плазмохимическое травление InP/InGaAs гетероструктуры в индуктивно связанной плазме Cl₂/Ar/N₂ для формирования оптических волноводных структур

Представлены результаты разработки процесса плазмохимического травления InP/InGaAs в индуктивно связанной плазме в газовой смеси Cl₂/Ar/N₂. Показаны зависимости влияния режимов процесса на профиль и шероховатость поверхности формируемых волноводных структур.

Ключевые слова: оптоэлектроника, фосфид индия, плазмохимическое травление, волноводные структуры.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-28-32

В настоящее время оптоэлектроника является динамично развивающимся направлением науки и техники. При создании интегральных оптоэлектронных устройств InP является одним из базовых материалов, позволяющих создавать как активные, так и пассивные элементы (в частности, электрооптические модуляторы, волноводы, делители оптического излучения и др.) [1]. Создание оптоэлектронных приборов зачастую требует формирования волноводных структур с высоким аспектным соотношением. Использование методов жидкостного химического травления позволяет получить гладкую поверхность с минимальным уровнем дефектов. Однако контроль профиля травления в данных методах ограничен [2], вследствие чего они редко используются для формирования элементов с высоким аспектным соотношением. Для получения волноводных структур с высоким аспектным соотношением и низкой шероховатостью поверхности используются методы плазмохимического травления (ПХТ). Одним из таких методов, получивших наибольшее распространение, является ПХТ в индуктивно связанной плазме. Преимуществом данного метода является возможность независимого управления плотностью и энергией ионов плазмы, что позволяет гибко управлять режимами травления [3].

Для ПХТ InP наибольшее распространение получили процессы с использованием газовых смесей на основе CH₄/H₂ и Cl₂ [3–15]. Травление в газовой смеси CH₄/H₂ позволяет получить гладкую поверхность после травления с высоким аспектным соотношением формируемых структур. В то же время недостатками процессов на CH₄/H₂ являются низкая скорость травления вследствие образования и пересаживания пассивирующего полимера, а также проникновение водорода в подложку, что может вызывать деградацию параметров устройств [7].

Другим широко используемым подмножеством процессов травления InP является травление в хлорсодержащей плазме. Для получения профиля структур с высоким аспектным соотношением в состав газовой смеси вводятся пассивирующие добавки N₂, O₂ и др. [3–8, 13–15]. Травление InGaAs может быть проведено совместно с InP с использованием хлорсодержащей плазмы. Однако процессам на основе

хлора, также присущи свои недостатки. Образующиеся в процессе травления InCl_x соединения обладают низкой летучестью при комнатной температуре. Пересаживание InCl_x на подложку может приводить к высокому уровню шероховатости поверхности формируемых структур. Для решения данной проблемы обычно перед травлением подложка нагревается до 150 °С и выше [3–6, 8, 9], что повышает требования к установке для травления. В работе [15] представлено травление InP в индуктивно связанной плазме Cl₂/N₂ при комнатной температуре. Показано, что можно эффективно управлять десорбцией InCl_x пленок с поверхности подложки за счет усиления роли физической составляющей процесса травления.

В данной работе представлены результаты разработки процесса ПХТ InP/InGaAs в индуктивно связанной плазме Cl₂/Ar/N₂ без предварительного нагрева подложки для формирования волноводных структур с высоким аспектным соотношением и низкой шероховатостью поверхности.

Методика эксперимента

В экспериментах были использованы полуизолирующие подложки InP, на поверхности которых была сформирована InP/InGaAs *p-i-n*-гетероструктура.

Для травления InP на поверхности подложки формировалась маска нитрида кремния толщиной 300 нм. Осаждение пленки нитрида кремния проводилось методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Далее в диэлектрике методом ПХТ в индуктивно связанной плазме по однослойной маске фоторезиста выполнялось формирование линий различной ширины (1–3 мкм). Маска фоторезиста формировалась методом контактной литографии.

После снятия фоторезиста пластины делились на образцы с площадью около 1 см². Далее на установке Corial 200IL проводилось ПХТ InP/InGaAs в индуктивно связанной плазме с использованием газовой смеси Cl₂/Ar/N₂ в различных режимах. В режимах травления менялись: состав газовой смеси, величина мощности, приложенной между электродами (radio frequency power – W_{RF}), давление процесса. Величина мощности индуктивного (inductively coupled plasma power – W_{ICP}) разряда во всех

режимах была зафиксирована на уровне 700 Вт, поток Ar составлял 20 см³/мин.

После травления образцы раскалывались поперек сформированных элементов рельефа. Контроль образцов проводился с использованием метода сканирующей электронной микроскопии на установке Raith 150two. На образцах контролировались: профиль, глубина травления и толщина нарушенного слоя.

Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены микроскопические изображения профиля травленных структур и зависимость скорости травления InP в плазме Cl₂/Ar/N₂ от соотношения потоков азота и хлора, при фиксированных значениях W_{RF} мощности 100 Вт и давлении процесса 5 мТорр.

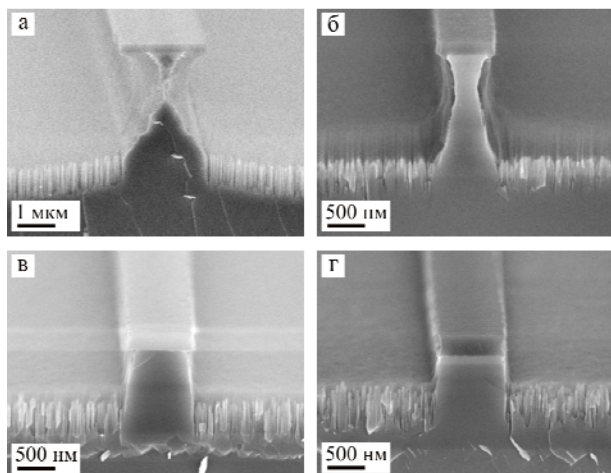


Рис. 1. Микроскопические изображения поперечного сечения структур, сформированных после травления в плазме Cl₂/Ar/N₂ с разным соотношением потоков N₂/Cl₂: (а) 0/30; (б) 10/20; (в) 15/15 и (г) 20/10 см³/мин, при мощности W_{RF}, равной 100 Вт, и давлении процесса 5 мТорр

Как видно из рис. 1, а при травлении в плазме Cl₂/Ar наблюдается значительный боковой подтрав InP. Увеличение доли азота в составе газовой смеси приводило к монотонному уменьшению величины бокового подтрав, и при равных потоках азота и хлора (рис. 1, в) боковой подтрав практически отсутствовал.

Из рис. 2 видно также, что увеличение доли азота в составе газовой смеси приводило к снижению скорости травления InP. Зависимость скорости травления от соотношения потоков азота и хлора имела нелинейный вид с явно прослеживающейся тенденцией к насыщению. Более резкое снижение скорости травления InP в сравнении со снижением содержания хлора в составе газовой смеси свидетельствует о том, что на снижение скорости травления InP помимо снижения концентрации ионов хлора влияло формирование пассивирующего слоя на поверхности InP.

На рис. 3 и 4 представлены микроскопические изображения профиля травленных структур и зависимости скорости травления InP и толщины нарушенного слоя после травления в плазме Cl₂/Ar/N₂ от величины W_{RF} мощности при фиксированных соот-

ношениях потоков азота и хлора 20 и 10 см³/мин соответственно и давлении процесса 5 мТорр.

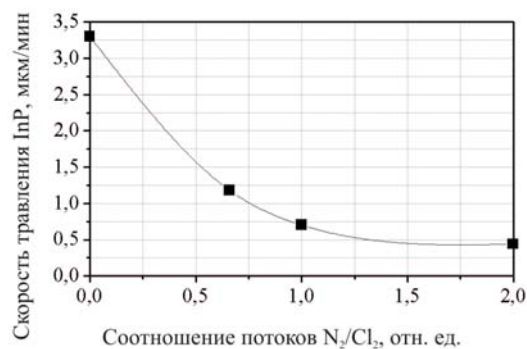


Рис. 2. Зависимость скорости травления InP в плазме Cl₂/Ar/N₂ от соотношения потоков N₂/Cl₂ при общем потоке N₂ + Cl₂, равном 30 см³/мин; мощности W_{RF}, равной 100 Вт, и давлении процесса 5 мТорр

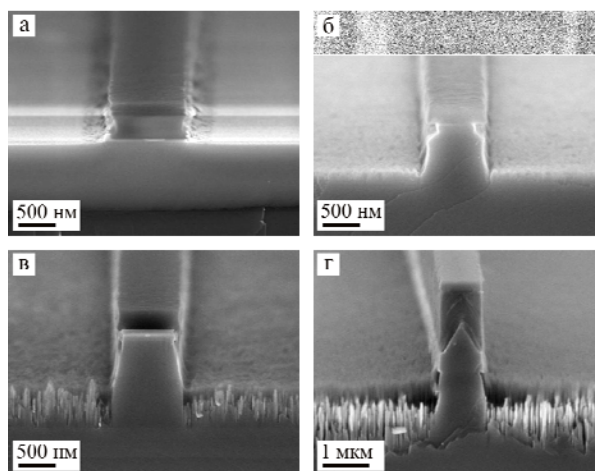


Рис. 3. Микроскопические изображения поперечного сечения травленных структур после травления в плазме Cl₂/Ar/N₂ при разных значениях W_{RF} мощности: (а) 25; (б) 50; (в) 75 и (г) 200 Вт, при соотношении потоков N₂/Cl₂, равном 20/10 см³/мин, и давлении процесса 5 мТорр

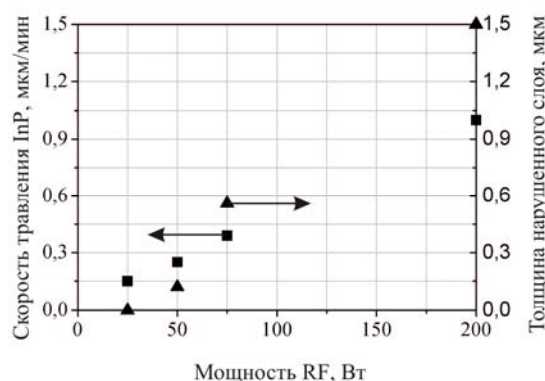


Рис. 4. Зависимости скорости травления InP в плазме Cl₂/Ar/N₂ и толщины нарушенного слоя после травления от W_{RF} мощности, при соотношении потоков N₂/Cl₂, равном 20/10 см³/мин, и давлении процесса 5 мТорр

Как видно из рис. 3 и 4, с повышением величины W_{RF} мощности и фиксированных остальных параметрах процесса скорость травления InP линейно возрастала, достигнув 1 мкм/мин при мощности 200 Вт. Также с повышением мощности увеличива-

лась анизотропия процесса травления. Но еще более резкий рост наблюдался в толщине нарушенного слоя. Если при величине W_{RF} мощности равной 25 Вт, после процесса травления наблюдалась гладкая морфология поверхности InP, формирование нарушенного слоя не прослеживалось, то при повышении мощности до 50 Вт толщина нарушенного слоя после травления составляла порядка 0,13 мкм, а дальнейший рост мощности до 75 Вт приводил к скачкообразному увеличению толщины слоя до 0,55 мкм, достигнув 1,5 мкм при мощности разряда 200 Вт.

На рис. 5 представлены зависимости толщины нарушенного слоя и угла наклона вертикальных поверхностей элементов сформированных после травления в плазме $Cl_2/Ar/N_2$ от величины давления процесса при фиксированных соотношениях потоков азота и хлора 20 и 10 cm^3/min соответственно и величине W_{RF} мощности равной 100 Вт.

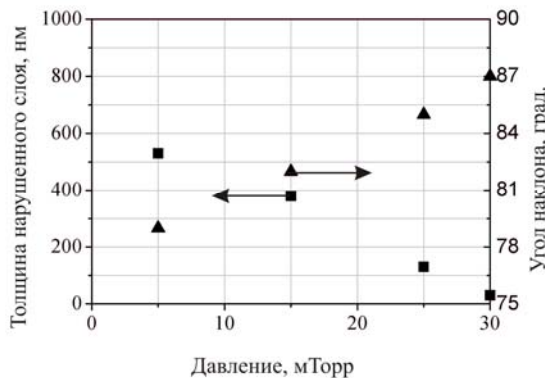


Рис. 5. Зависимости толщины нарушенного слоя и угла наклона профиля формируемых элементов после травления в плазме $Cl_2/Ar/N_2$ от величины давления процесса, при соотношении потоков N_2/Cl_2 , равном 20/10 cm^3/min , и мощности W_{RF} , равной 100 Вт

Из зависимостей на рис. 5 видно, что повышение общего давления процесса с 5 до 30 мТорр при зафиксированных остальных параметрах процесса привело к монотонному уменьшению толщины нарушенного слоя с 0,55 мкм до величины менее 0,03 мкм. Также увеличение давления привело к улучшению анизотропности процесса. При максимальном использованном давлении угол наклона вертикальных поверхностей формируемых элементов достиг 87 град.

Наиболее оптимальное формирование элементов рельефа происходило при следующих параметрах процесса травления: состав газовой смеси $Cl_2/Ar/N_2$ 10/20/20 cm^3/min , мощность W_{RF} равна 100 Вт, при мощности W_{ICP} , равной 700 Вт, и давлении процесса 30 мТорр. На рис. 6 показано микроскопическое изображение поперечного сечения травленной InP/InGaAs гетероструктуры после травления в плазме $Cl_2/Ar/N_2$ с использованием оптимизированного режима травления. Как видно из рисунка, разработанный процесс характеризуется высокой анизотропностью и гладкой морфологией поверхно-

сти InP после травления. Скорость травления InP составила 0,55–0,6 мкм/мин.

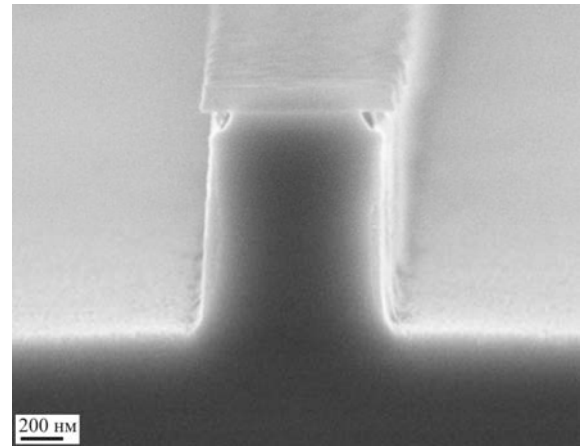


Рис. 6. Микроскопическое изображение поперечного сечения травленной InP/InGaAs гетероструктуры при соотношении потоков N_2/Cl_2 , равном 20/10 cm^3/min , мощности W_{RF} , равной 100 Вт, и давлении процесса 30 мТорр

Заключение

В данной работе представлены результаты исследования процесса плазмохимического травления InP/InGaAs гетероструктуры в индуктивно связанной плазме $Cl_2/Ar/N_2$. Разработанный процесс травления характеризуется высокой анизотропностью (угол наклона профиля травления составляет 87 град), скорость травления InP достигает 0,55–0,6 мкм/мин, при этом глубина нарушенного слоя не превышает 30 нм. Преимуществом процесса также является отсутствие необходимости предварительного разогрева подложки. Разработанный процесс может быть использован для формирования волноводных структур с высоким аспектным соотношением в оптических приборах на InP.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения № 14.577.21.0281 от 23.10.17, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0281.

Литература

1. Status and progress in InP optoelectronic processing: toward higher levels of integration / J.L. Pleumeekers, R.P. Schneider, A. Mathur et al. // CS Mantech Conference. – Vancouver, 2006. – P. 115–118.
2. Wet chemical etching of alignment V-grooves in (100) InP through titanium or $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ masks / R. Klockenbrink, E. Peiner, H.-H. Wehmann, A. Schlachetzki // J. Electrochem. Soc. – 1994. – Vol. 141, № 6. – P. 1594–1599.
3. Deng L. Dry etching of InP-based materials using a high-density ICP plasma system // Semiconductor today Compounds & Advanced Silicon. – 2013. – Vol. 7, № 10. – P. 82–87.
4. Deep etching of DBR gratings in InP using Cl_2 based ICP processes / B. Docter, E.J. Geluk, M.J.H. Sander-Jochem, F. Karouta, M.K. Smit // Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter. – Eindhoven, 2006. – P. 97–100.
5. Effect of H_2 on the etch profile of InP/InGaAsP alloys in $Cl_2/Ar/H_2$ inductively coupled plasma reactive ion etching chemistries for photonic device fabrication / S.L. Rommel,

J.-H. Jang, W. Lu et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 2002. – Vol. 20, № 4. – P. 1327–1330.

6. Carlstrom C.F. Cl₂/O₂-inductively coupled plasma etching of deep hole-type photonic crystals in InP / C.F. Carlstrom, R. van der Heijden, F. Karouta, R.W. van der Heijden, H.W.M. Salemink // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 2006. – Vol. 24, № 1. – P. 1306–1309.

7. Anisotropic etching of InP and InGaAs by using an inductively coupled plasma in Cl₂/N₂ and Cl₂/Ar mixtures at low bias power / J.W. Bae, C.H. Jeong, J.T. Lim et al. // *J. of Korean Phys. Soc.* – 2007. – Vol. 50, № 4. – P. 1130–1135.

8. Comparative study of Cl₂, Cl₂/O₂, and Cl₂/N₂ inductively coupled plasma processes for etching of high-aspect-ratio photonic crystals holes in InP / C.F. Carlstrom, R. van der Heijden, M.S.P. Andriess et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 2008. – Vol. 26, № 5. – P. 1675–1683.

9. Siwak N.P. Fabrication challenges for indium phosphide microsystems / N.P. Siwak, X.Z. Fan, R. Ghodssi // *J. Micromech. Microeng.* – 2015. – Vol. 25. – P. 1317–1331.

10. Deep dry etching process development for InP-based photonic crystals / R. van der Heijden, E. van der Drift, E.J. Geluk et al. // *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter.* – Enschede, 2003. – P. 257–260.

11. Investigation of InP etching mechanisms in a Cl₂/H₂ inductively coupled plasma by optical emission spectroscopy / L. Gatilova, S. Bouchoule, S. Guilet, P. Chabert // *J. Vac. Sci. Technol. A.* – 2009. – Vol. 27, № 2. – P. 262–275.

12. Effect of Cl₂- and HBr-based inductively coupled plasma etching on InP surface composition analyzed using in situ x-ray photoelectron spectroscopy / S. Bouchoule, L. Vallier, G. Patriarche, T. Chevolleau, C. Cardinaud // *J. Vac. Sci. Technol. A.* – 2012. – Vol. 30, № 3. – P. 1116–1127.

13. ICP etching of InP and its applications in photonic circuits / Y.C. Zhu, F. Karouta, E.J. Geluk et al. // *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter.* – Enschede, 2003. – P. 81–84.

14. Vertical and smooth, etching of InP by Cl₂/CH₄/Ar inductively coupled plasma at room temperature / C.Z. Sun, J.B. Zhou, B. Xiong, J. Wang, Y. Luo // *Chin. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 20, № 8. – P. 1312–1314.

15. Chee-Wei L. Room-temperature inductively coupled plasma etching of InP using Cl₂/N₂ and Cl₂/CH₄/H₂ / L. Chee-Wei, C. Mee-Koy // *Chin. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 23, № 4. – P. 903–906.

Ишуткин Сергей Владимирович

Канд. техн. наук, вед. инженер
НПК «Микроэлектроника», АО «НПФ «Микран»
Тел.: +7-923-405-56-58
Эл. почта: ishutkin@micran.ru

Арыков Вадим Станиславович

Канд. техн. наук, м.н.с. каф. ФЭ
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Тел.: +7-903-953-10-37
Эл. почта: arblkob@yandex.ru

Жидик Юрий Сергеевич

Аспирант каф. ФЭ ТУСУРа
Тел.: +7-923-414-12-32
Эл. почта: zhidikyur@mail.ru

Троян Павел Ефимович

Д-р техн. наук, профессор каф. ФЭ,
директор департамента образования ТУСУРа
Тел.: 8 (383-2) 41-39-36
Эл. почта: P.E.Troyan@mail.ru

Ishutkin S.V., Arykov V.S., Zhidik Y.S., Troyan P.E. Inductively coupled plasma etching of InP/InGaAs heterostructure for optical waveguide structures

In the paper are shown the results of the development of inductively coupled plasma etching process of InP / InGaAs in the gas mixture Cl₂/Ar/N₂. The dependences of the influence of process parameters on the profile and surface roughness of the waveguide structures are shown.

Keywords: optoelectronics, indium phosphide, plasma-chemical etching.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-28-32

References

1. Status and progress in InP optoelectronic processing: toward higher levels of integration / J.L. Pleumeekers, R.P. Schneider, A. Mathur et al. // *CS Mantech Conference.* Vancouver, 2006, pp. 115–118.

2. Wet chemical etching of alignment V-grooves in (100) InP through titanium or In_{0.53}Ga_{0.47}As masks / R. Klockenbrink, E. Peiner, H.-H. Wehmann, A. Schlachetzki // *J. Electrochem. Soc.* 1994., vol. 141, № 6, pp. 1594–1599.

3. Deng L. Dry etching of InP-based materials using a high-density ICP plasma system // *Semiconductor Today Compounds & Advanced Silicon.* 2013, vol. 7, № 10, pp. 82–87.

4. Deep etching of DBR gratings in InP using Cl₂ based ICP processes / B. Docter, E.J. Geluk, M.J.H. Sander-Jochem, F. Karouta, M.K. Smit // *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter.* Eindhoven, 2006, pp. 97–100.

5. Effect of H₂ on the etch profile of InP/InGaAsP alloys in Cl₂/Ar/H₂ inductively coupled plasma reactive ion etching chemistries for photonic device fabrication / S.L. Rommel, J.-H. Jang, W. Lu et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2002, vol. 20, № 4, pp. 1327–1330.

6. Cl₂/O₂-inductively coupled plasma etching of deep hole-type photonic crystals in InP / C.F. Carlstrom, R. van der Heijden, F. Karouta, R.W. van der Heijden, H.W.M. Salemink // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2006, vol. 24, № 1, pp. 1306–1309.

7. Anisotropic etching of InP and InGaAs by using an inductively coupled plasma in Cl₂/N₂ and Cl₂/Ar mixtures at low bias power / J.W. Bae, C.H. Jeong, J.T. Lim, H.C. Lee, G.Y. Yeom, I. Adesida // *J. of Korean Phys. Soc.* 2007, vol. 50, № 4, pp. 1130–1135.

8. Comparative study of Cl₂, Cl₂/O₂, and Cl₂/N₂ inductively coupled plasma processes for etching of high-aspect-ratio photonic crystals holes in InP / C.F. Carlstrom, R. van der Heijden, M.S.P. Andriess, F. Karouta et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2008, vol. 26, № 5, pp. 1675–1683.

9. Siwak N.P. Fabrication challenges for indium phosphide microsystems / N.P. Siwak, X.Z. Fan, R. Ghodssi // *J. Micromech. Microeng.* 2015, vol. 25, pp. 1317–1331.

10. Deep dry etching process development for InP-based photonic crystals / R. van der Heijden, E. van der Drift, E.J. Geluk et al. // *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter.* Enschede, 2003, pp. 257–260.

11. Investigation of InP etching mechanisms in a Cl₂/H₂ inductively coupled plasma by optical emission spectroscopy /

L. Gatilova, S. Bouchoule, S. Guilet, P. Chabert // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2009, vol. 27, № 2, pp. 262–275.

12. Effect of Cl₂- and HBr-based inductively coupled plasma etching on InP surface composition analyzed using in situ x-ray photoelectron spectroscopy / S. Bouchoule, L. Vallier, G. Patriarche, T. Chevolleau, C. Cardinaud // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2012, vol. 30, № 3, pp. 1116–1127.

13. ICP etching of InP and its applications in photonic circuits / Y.C. Zhu, F. Karouta, E.J. Geluk et al. // *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*. Enschede, 2003, pp. 81–84.

14. Vertical and smooth, etching of InP by Cl₂/CH₄/Ar inductively coupled plasma at room temperature / C.Z. Sun, J.B. Zhou, B. Xiong, J. Wang, Y. Luo // *Chin. Phys. Lett.* – 2003. vol. 20, № 8, pp. 1312–1314.

15. Chee-Wei L. Room-temperature inductively coupled plasma etching of InP using Cl₂/N₂ and Cl₂/CH₄/H₂ / L. Chee-Wei, C. Mee-Koy // *Chin. Phys. Lett.* 2006, vol. 23, № 4, pp. 903–906.

Sergey V. Ishutkin

PhD, Principal Engineer of the Technological Research Group of Microelectronics Department, MICRAN, Research and Production Company
51 d, Kirov av., Tomsk, Russia, 634041
Phone: +7-923-405-56-58
Email: ishutkin@micran.ru

Vadim S. Arykov

PhD, Assistant Scientist of the Department of Physical Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-903-953-10-37
Email: apblkob@yandex.ru

Yuriy S. Zhidik

PhD student of the Department of Physical Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-414-12-32
Email: zhidikyur@mail.ru

Pavel E. Troyan

Doctor of Engineering, Professor,
Director of Academic Directorate,
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (383-2) 41-39-36
Email: P.E.Troyan@mail.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

УДК 004.056.53

П.С. Ложников, С.С. Жумажанова

Об угрозах безопасности сведений ограниченного доступа в системах смешанного документооборота и правовом регулировании в области применения цифровых подписей с биометрической активацией

Рассматривается вопрос внедрения технологии гибридного документооборота и необходимость внесения соответствующих изменений в нормативно-правовую базу Российской Федерации. Приведена предварительная оценка масштаба таких изменений. Построена модель нарушителя и актуальных угроз безопасности информации в системах смешанного документооборота, обозначены пути нейтрализации выявленных угроз механизма гибридного документооборота.

Ключевые слова: смешанный документооборот, биометрическая идентификация, электронная подпись, гибридный документооборот, модель угроз.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-35-43

Последние данные о развитии рынка систем электронного документооборота (СЭД) показывают положительную динамику роста спроса на такие системы. Ежегодный прирост объема рынка СЭД в России составляет от 10% [1]. Нормативно-правовое регулирование в сфере электронного документооборота (ЭДО) также совершенствуется, но внедрение новых технологий требует внесения разного рода корректировок в законодательную сферу. Масштаб вносимых изменений зависит от внедряемой в СЭД технологии. Правительство РФ, приняв во внимание происходящие трансформации в сфере информационных технологий, их повсеместное распространение во все области производства и услуг, разработало программу «Цифровая экономика Российской Федерации» (далее – программа). Программа устанавливает данные в цифровой форме в качестве ключевого элемента взаимодействия сферы производства и социально-экономической деятельности, нацелена на устранение препятствий и ограничений для создания высокотехнологических бизнесов и повышение конкурентоспособности РФ на глобальном рынке. Ограничения и препятствия, описанные в программе, включают наличие правовых пробелов для перехода к полностью безбумажному документообороту, а также значимости цифровых данных, в том числе применительно к документам на бумажном носителе.

Документ – ключевой элемент системы электронного и бумажного документооборота, так как на обеспечение его безопасности и аутентичности направлено совершенствование информационных технологий и нормативно-правовой базы. Электронный документ, как правило, защищен электронной подписью (ЭП), позволяющей идентифицировать лицо, подписавшее документ, подделать такую подпись в отличие от обычной рукописной практически невозможно, но можно ее потерять. ЭП с биометрической активацией позволяет устранить эту проблему – закрытый ключ ЭП генерируется заранее заданным криптографическим алгоритмом после предъявле-

ния пользователем своего биометрического образа при каждом подписании документа. Так как на сегодняшний день перейти к полностью безбумажному документообороту невозможно, а именно наблюдается практика внедрения смешанного документооборота, то необходимо решить вопрос применения ЭП к бумажному документу. Техническая сторона этого вопроса находится на стадии его решения [2], в то же время нормативно-правовая база нуждается в корректировке: требуется провести анализ того, как предложенный механизм защиты документа решит проблемы нейтрализации актуальных угроз безопасности информации, а также будет ли такой документ иметь юридическую силу, и оценить масштабы изменения нормативно-правовой базы РФ для решения этого вопроса.

Актуальные угрозы информационной безопасности сведений ограниченного доступа и способы борьбы с ними в системах смешанного документооборота

Документ в любой форме его представления на любом этапе его жизненного цикла (ЖЦ) подвержен угрозам информационной безопасности, поэтому необходимо своевременно идентифицировать их источники. В РФ полномочия по своевременному выявлению новых угроз и их источников, а также разработке соответствующих методических документов возлагаются на федеральный орган исполнительной власти в области обеспечения безопасности (ФСБ России) и федеральный орган исполнительной власти, уполномоченный в области противодействия техническим разведкам и технической защиты информации (ФСТЭК России). Источниками угроз, как правило, выступают антропогенные факторы – нарушители, злоумышленники. Успех нарушителя при реализации угрозы определяется следующими факторами: его потенциалом (возможностями, квалификацией), мотивами и положением относительно среды обращения документа (внешний, внутренний), методами реализации угроз(ы), уязвимостями объекта нападения, которые могут быть различны для

отдельных стадий ЖЦ документа. Приведенные факторы отражены в методических документах ФСТЭК [3] и ФСБ [4] России, используемых для создания моделей угроз и нарушителей в информационных системах (ИС), обрабатывающих сведения конфиденциального характера.

Как правило, первоначальным базисом классификации нарушителей в документах ФСТЭК и ФСБ России является их положение относительно среды обращения документа, т.е. наличие у них прав доступа и возможностей по доступу к информации и (или) к компонентам информационной системы, что дает возможность разделить нарушителей на два типа:

– внешние нарушители – это лица, которые не имеют права доступа к ИС и ее компонентам, но имеют возможность реализовать угрозу за пределами границ ИС;

– внутренние нарушители – это лица, которые имеют право постоянного (разового) доступа к ИС и ее компонентам.

При этом важно учитывать, что, как правило, последние обладают наибольшими возможностями при реализации угроз, внешний нарушитель может действовать совместно с внутренним нарушителем, а также в составе группы, реализация угрозы возможна в любой точке ИС, в качестве точки атаки на всю ИС или ее часть нарушитель выберет самое слабое звено ИС, при наличии подключения к сети Интернет высока вероятность воздействия со стороны внешнего нарушителя. Данные два вида нарушителей с учетом указанных выше факторов делятся на категории. Описание каждой категории нарушите-

лей информационной безопасности, а также способов доступа и наличие полномочий при реализации угрозы приведены в табл. 1.

В практике разработки моделей актуальных угроз и нарушителей безопасности сведений конфиденциального характера указанная категоризация охватывает весь спектр нарушителей, являющихся источником потенциальных угроз. Состав и содержание самих угроз определяются в том числе совокупностью условий и факторов, создающих опасность несанкционированного (в том числе случайного) доступа к защищаемым сведениям. Обоснование актуальности / неактуальности угроз сопровождается описанием организационно-технических мер, позволяющих нейтрализовать такие угрозы. Типовая модель угроз для ИС, имеющих подключение к сетям общего пользования, включает в себя следующие классы угроз [3]:

– угрозы утечки информации по техническим каналам;

– угрозы несанкционированного доступа (НСД) к данным, обрабатываемым на автоматизированном рабочем месте, в том числе угрозы из внешних сетей.

Описание подклассов угроз применительно к системам смешанного документооборота представлено на рис. 1.

В табл. 2 представлена модель угроз применительно к системам смешанного документооборота, в которых производится обработка сведений исключительно конфиденциального характера. Данная модель является абстрактной без привязки к конкретной ИС, поэтому значения вероятностей реализации угроз в данном случае отсутствуют.

Таблица 1

Категории нарушителей информационной безопасности

№ п/п	Тип нарушителя	Категория ФСБ – Ni, ФСТЭК – Nj (условное обозначение)	Способ доступа и полномочия доступа к персональным данным
1	Внешний	N1, N2, N0	Лица без доступа к ИС и защищаемым данным, но с возможностью самостоятельно планировать и осуществлять атаки только за пределами контролируемой зоны (КЗ), а также в пределах КЗ без физического доступа к аппаратным элементам ИС
2	Внутренний	N3, N1	Зарегистрированные пользователи ИС, имеющие санкционированный доступ к аппаратным компонентам ИС, на которых в том числе реализованы средства криптографической защиты информации (СКЗИ), но не имеющие доступа к защищаемым данным. Лица, осуществляющие разработку, поставку, сопровождение и ремонт технических средств ИС
3		N4, N5, N2, N3	Зарегистрированные пользователи ИС, осуществляющие доступ к ресурсам ИС с рабочего места. Зарегистрированные пользователи ИС, имеющие удаленный доступ к защищаемым данным. Имеют возможность привлекать специалистов, имеющих опыт разработки и анализа СКЗИ
4		N4, N5, N4, N5, N6	Зарегистрированные пользователи ИС с полномочиями системного администратора, администратора безопасности сети (сегмента сети) ИС. Имеют возможность привлекать специалистов, имеющих опыт разработки и анализа СКЗИ
5		N6, N7	Программисты-разработчики прикладного программного обеспечения (ПО) и лица, обеспечивающие поставку и сопровождение ПО в ИС. Имеют возможность привлекать специалистов в области разработки и анализа СКЗИ

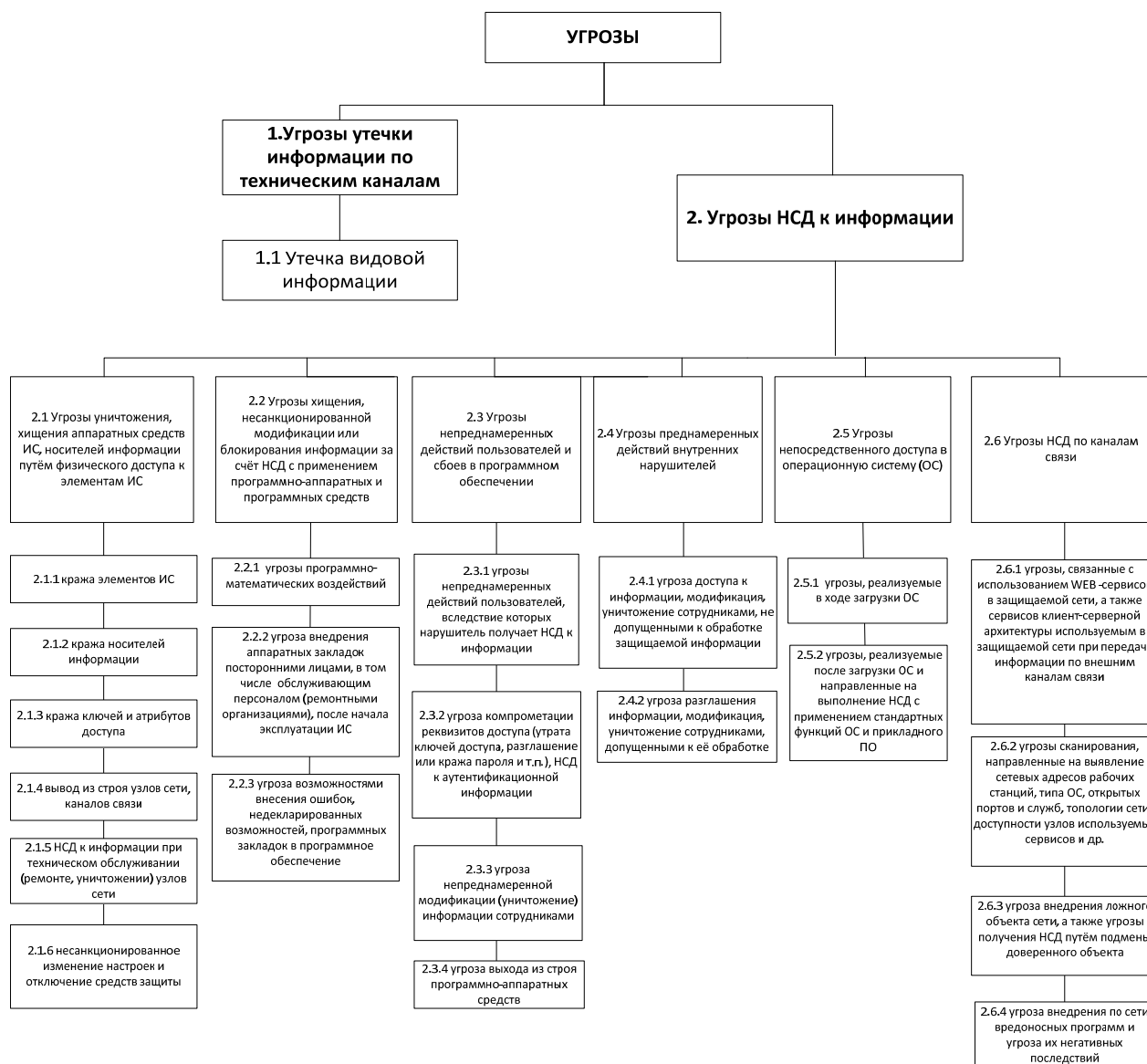


Рис. 1. Классы угроз смешанного документооборота

Таблица 2

Обобщенная модель угроз смешанного документооборота

Угроза	Реализация угрозы	Меры защиты	Нарушители
1	2	3	4
1.1	– Удаленный просмотр со средств отображения информации; – просмотр помощью скрытых устройств видеонаблюдения	– Установка жалюзи, штор. – Расположение средств отображения информации с учётом предотвращения возможного просмотра на них такой информации	H1, H2, N0
2.1.1	– Вынос пользователями учетных машинных носителей информации (МНИ);	– Круглосуточная охрана помещений ИС. – Физическая охрана средств вычислительной техники. – Утверждение организационно-распорядительных документов (ОРД), регламентирующих порядок доступа в помещения сотрудников и посторонних лиц	H3-H5, N1-N6
2.1.2	– несанкционированное копирование информации на неучтенные МНИ;		
2.1.3	– отправка защищаемой информации (в том числе изображений) по сети Интернет посредством персональных компьютеров и смартфонов		
2.1.4	– НСД нарушителями в помещения, где расположены элементы сетевой инфраструктуры и проходят каналы связи организации, с последующим деструктивным воздействием на них		

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
2.1.5	<ul style="list-style-type: none"> – НСД нарушителями в помещения, где расположены элементы сетевой инфраструктуры и проходят каналы связи организации, с последующим деструктивным воздействием на них; – за пределами КЗ при техническом обслуживании (ремонте) элементов ИС; – при бесконтрольном выполнении работ сторонних организаций внутри КЗ 	Утверждение ОРД, регламентирующих порядок доступа в помещения сотрудников и посторонних лиц, а также правила проведения технического обслуживания элементов ИС, в том числе при выносе за пределы КЗ	Н1-Н5, N0, N4-N6
2.1.6	<ul style="list-style-type: none"> – НСД нарушителями в помещения, где расположены средства защиты ИС, при получении указанными; – пользователями прав администратора в результате непреднамеренных действий администраторов; – намеренное отключение, изменение настроек средств защиты информации системными администраторами, направленные на НСД к информации 	<ul style="list-style-type: none"> – Утверждение ОРД по работе с установленными средствами защиты. – Назначение ответственных лиц в ИС организации (администратора безопасности) 	Н3-Н5, N1-N6
2.2.1	<ul style="list-style-type: none"> – Деструктивное программное воздействие нарушителем на некоторые программы или систему в целом путём изменения компонентов программной среды; – внедрение программных компонентов, в том числе вредоносного ПО; – перехват данных, поступающих от периферийных устройств; – искажение исходного кода прикладного и системного ПО; – внедрение вредоносного кода в прикладное и системное ПО при использовании уязвимостей исходного кода ПО; – восстановление некорректно удаленных данных с внешних/внутренних носителей информации 	<ul style="list-style-type: none"> – Установка лицензионного ПО. – Утверждение ОРД в части организации мер антивирусной защиты. – Назначение ответственных лиц в ИС организации (администратора безопасности) 	Н1-Н3, N0, N1
2.2.2	<ul style="list-style-type: none"> – При непосредственном доступе к ресурсам ИС путем внедрения аппаратных закладок; – при техническом обслуживании элементов ИС 	Утверждение ОРД, регламентирующих порядок доступа в помещения сотрудников и посторонних лиц, а также правила проведения технического обслуживания элементов ИС, в том числе при выносе элементов за пределы КЗ	Н1, Н2, N0
2.2.3	В процессе разработки программного обеспечения	<ul style="list-style-type: none"> – Установка лицензионного ПО. – Периодическое обновление ПО. – Назначение ответственных лиц в ИС организации (администратора безопасности) 	Н6, N7
2.3.1	<ul style="list-style-type: none"> – Предоставление пользователем/администратором своими непреднамеренными действиями (бездействием) возможности внешнему нарушителю получения НСД к информации в ИС 	<ul style="list-style-type: none"> – Утверждение ОРД о необходимости соблюдения конфиденциальности в отношении обрабатываемых данных и содержащие правила и порядок обработки/уничтожения защищаемых сведений; ознакомление пользователей и ответственных лиц с указанными ОРД 	Н1-Н5, N0-N6
2.3.2	<ul style="list-style-type: none"> – Действия человеческого фактора пользователей ИС при нарушении ими парольной политики, передаче ключей доступа третьим лицам; – НСД к участкам оперативного или постоянного запоминающих устройств, в которых хранится информация для аутентификации 	<ul style="list-style-type: none"> – Утверждение требований к выбору паролей и периодичности смены паролей (парольной политики). – Проведение инструктажей о действиях в случаях утраты или компрометации паролей 	Н3-Н5, N1-N6
2.3.3	<ul style="list-style-type: none"> – Действия человеческого фактора пользователей ИС при невыполнении ими положений по работе с защищаемыми сведениями 	<ul style="list-style-type: none"> – Утверждение ОРД, содержащих правила и порядок обработки сведений конфиденциального характера, а также порядок резервного копирования и восстановления защищаемой информации 	Н3-Н5, N2-N6

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
2.3.4	– Сбой в работе аппаратно-программных средств, входящих в состав ИС	– Утверждение ОРД в части реализации мер по резервному копированию баз данных, содержащих сведения конфиденциального характера. – Назначение ответственных лиц (администратора безопасности)	H3-H5, N1-N6
2.4.1	– НСД пользователями, не допущенными к обработке защищаемой информации, но способным теми или иными способами ее получить	– Утверждение ОРД, регламентирующих порядок доступа в помещения сотрудников и посторонних лиц. – Круглосуточная охрана помещений ИС. – Физическая охрана средств вычислительной техники со стороны сотрудников охраны и сотрудников организации. – Установка на окнах жалюзи либо штор. – Расположение средств отображения защищаемой информации (экраны дисплеев, бумажные носители и пр.) с учётом предотвращения возможного просмотра на них такой информации, в том числе с помощью оптических средств	H1-H3, N0, N1
2.4.2	– НСД Допущенными пользователями, преследующими корыстные цели вследствие своих противоправных действий	– Утверждение ОРД, содержащих правила и порядок обработки сведений конфиденциального характера. – Получение письменного обязательства о неразглашении защищаемой информации	H3-H5, N2-N6
2.5.1	– При получении доступа в операционную среду путем использования стандартных функций ОС либо прикладной программы для выполнения НСД	– Установка на ПЭВМ средства доверенной загрузки. – Утверждение ОРД, регламентирующих порядок доступа в помещения сотрудников и посторонних лиц.	H1-H5, N0-N6
2.5.2	– С помощью внешнего носителя для загрузки сторонней операционной системы или вредоносного программного обеспечения	– Круглосуточная охрана помещений ИС. – Физическая охрана средств вычислительной техники со стороны сотрудников охраны и сотрудников организации	H1-H5, N0-N6
2.6.1	– При использовании внутренних/внешних сервисов в защищаемой сети, с возможностями ограничения доступности сервисов, внешним нарушителем путём доступа/перехвата/изменения HTTP cookies, заражения DNS-кеша, искажения XML-схемы, использование альтернативных путей доступа к ресурсам	– Установка межсетевых экранов, позволяющего фильтровать входящий и исходящий трафик. – Криптографическое преобразование информации, передаваемой за пределы КЗ по каналам связи	H1, H2, N0
2.6.2	– С применением специального программного обеспечения – сетевой сканер		H1, H2, N0
2.6.3	– Путём подмены доверенного объекта сети с целью дальнейшего получения доступа к защищаемой информации, получения доступа к гипервизору, к механизмам администрирования среды виртуализации и др.		H1, H2, N0
2.6.4	– Путём внедрения по сети вредоносного программного обеспечения с целью дальнейшего получения НСД к ресурсам информационной системы, идентификационной/аутентификационной информации, ограничения доступа к ресурсам и сервисам и др.	– Установка лицензионного ПО. – Утверждение ОРД в части организации мер антивирусной защиты, в том числе своевременного обновления антивирусных баз, а также о правилах хранения и удаления данных с внешних/внутренних носителей информации. – Назначение ответственных лиц в ИС организации (администратора безопасности)	H1, H2, N0
2.6.5	– Путём перехвата информации, передаваемой по каналам связи, с целью дальнейшего анализа этой информации и получения НСД к сервисам ИС	– Установка межсетевых экранов, позволяющего фильтровать входящий и исходящий трафики. – Криптографическое преобразование информации, передаваемой за пределы КЗ по каналам связи	H1, H2, N0
2.6.6	– При отказе дискредитированной системой в доступе легальным пользователям при лавинообразном увеличении числа сетевых соединений с данной системой		H1, H2, N0

Из приведенной модели можно сделать вывод, что большая часть угроз нейтрализуется на практике внедрением организационно-распорядительных документов (ОРД), ознакомлением с ними сотрудников организации, распределением обязанностей по организационно-техническому обеспечению системы защиты информации, а также установкой специальных программно-технических средств, прошедших оценку соответствия требованиям по защите информации. Внедрение ОРД и проведение инструктажей направлено в значительной части на нейтрализацию человеческого фактора, однако даже если пользователь, следуя указаниям парольной политики, верно сгенерирует пароль, то избежать такого свойства пароля, как его отчуждаемость от пользователя, практически невозможно – он может быть утерян, забыт, украден, передан третьему лицу и т.д., что является сильнейшим недостатком данного типа аутентификации.

Гибридный документооборот представляет собой модификацию схемы смешанного документа, в котором:

- присутствует надежная привязка всех аутентификаторов субъекта (паролей, ключей, кодов доступа и т.д.) к его биометрическим характеристикам;

- обеспечивается равная защита документа как в электронном, так и в бумажном представлении; под равной защитой подразумевается использование одних тех же механизмов защиты для обоих форматов документа [5].

К тому же реализация такой модели документооборота обеспечивает соблюдение принципа экономической целесообразности, т.к. нет необходимости закупать дорогостоящее аппаратное обеспечение – имеется возможность реализации средств биометрической защиты на стандартном оборудовании компьютерных систем [6].

Правовое регулирование в сфере применения цифровых подписей

Техническая сторона вопроса по нейтрализации актуальных угроз безопасности информации в части передачи или утери персональных идентификаторов решена таким образом, чтобы не нарушить ставший привычным механизм документооборота – пользователи также используют веб-камеру и недорогой графический планшет, однако получаемые биометрические параметры используются для получения заранее сгенерированного закрытого ключа и формирования ЭП, которую, соответственно, невозможно кому-либо передать или потерять, а также подделать или украсть. Биометрический эталон и данные для генерации ключа хранятся в нейросетевом преобразователе «биометрия-код» (ПБК) в виде таблицы нейросетевых функционалов таким образом, что извлечь одну составляющую вычислительно сложно без знания другой [7]. Использование ПБК снимает вопрос о месте хранения закрытого ключа пользователя.

Гибридный документ имеет ряд отличий от привычных бумажной и электронной форматов документа: он также снабжен обязательными реквизитами юридически значимого документа, в том числе графическим изображением рукописной подписи (печати при необходимости), в дополнение к ним идут QR-коды, содержащие сгенерированную ЭП, ссылку на облако на оригинальный документ, а также синдромы исправления ошибок. Последние необходимы при переводе документа из бумажной формы в электронную и чтении его посредством специального OCR-приложения, выдающего минимальные ошибки при повторном печатании и сканировании документа (рис. 2) [8].



Рис. 2. Внешний вид гибридного документа

По приведенному описанию предложенной модели документооборота можно сделать вывод, что обеспечивается равная защита документов как в цифровой, так и аналоговой форме, и достигнутый таким образом уровень на порядок выше традиционных методов обеспечения защиты и подтверждения аутентичности документа.

В повседневной практике подтверждение юридической значимости документов, подписанных ЭП, после истечения срока действия сертификата проверки ЭП, выданных аккредитованным удостоверяющим центром (УЦ), ложатся на плечи УЦ. Согласно ФЗ «Об электронной подписи» [9] УЦ должен вести реестр выданных сертификатов проверки ЭП, а также хранить информацию о владельцах выданных, в том числе аннулированных сертификатах проверки ЭП и т.д. При прекращении деятельности УЦ вся указанная информация передается для хранения в уполномоченный федеральный орган (ныне Минкомсвязь России).

Важный вопрос, который может возникнуть при анализе модели гибридного документооборота, заключается в следующем: будет ли графическое изо-

бражение подписи – одного из обязательных реквизитов документа – придавать ему юридическую силу? Прежде чем ответить на этот вопрос, важно отметить, что, проставив подпись в документе, должностное лицо берет на себя ответственность за целостность и аутентичность документа и возможные последствия, следующие за его исполнением. В российском законодательстве есть некоторые допущения использования факсимильной подписи в документе, если такое предусмотрено соглашением сторон (п. 2 ст. 160 ГК РФ) [10]. В описанной модели гибридного документооборота пользователь каждый раз воспроизводит автограф на графическом планшете или ином устройстве сенсорного ввода при доступе в свой аккаунт, т.е. размещенное в документе графическое изображение подписи никак нельзя назвать факсимиле – оно является личной цифровой рукописной подписью владельца документа, к тому же подделать такую подпись невозможно, так как при аутентификации в личном кабинете учитываются динамические признаки воспроизведения подписи [11]. Принадлежность обычной рукописной подписи, также называемой физической, к конкретному лицу доверенная сторона, как правило, устанавливает по ее внешнему виду, которое злоумышленник может повторить после некоторого времени тренировок (в отличие от динамических характеристик) – мало кто при обычной проверке документа прибегает к помощи графологов.

Технология цифровой рукописной подписи еще не закреплена в российском законодательстве, но подобного можно ожидать в ближайшее время. Правительственной комиссией по использованию информационных технологий были утверждены планы мероприятий, нацеленных на реализацию всех мер, зафиксированных в программе. По итогам Парламентских слушаний в Государственной думе Федерального собрания Российской Федерации на тему «Формирование правовых условий финансирования и развития цифровой экономики» от 20 февраля 2018 г., одной из ключевых задач является унификация требований по идентификации, расширение возможностей и способов идентификации, в том числе урегулирование работы, а также статуса электронных документов, подписанных аналогом собственноручной подписи клиента на электронном планшете или ином устройстве.

С учетом нацеленности законодателей на принятие ЭП с биометрической активацией равноценной усиленной ЭП, остается открытым вопрос о внедрении этой технологии в организациях. Ограничится такой переход одним законодательным актом или рядом дополняющих друг друга нормативных документов, судить сложно. Рассмотрим один обязательный критерий принятия этой технологии как обязательного компонента системы защиты информации. Как известно, к системам защиты государственных муниципальных информационных систем предъявляется требование о наличии сертификата соответствия применяемых средств защиты, выдан-

ных уполномоченными органами (ФСТЭК и ФСБ России). Сертификация предлагаемой технологии генерации ЭП с биометрической активацией (ЭП, создаваемая только после аутентификации пользователя по биометрическим параметрам), имеет свои особенности. Принцип их работы основан на том, что каждый человек уникален, что, с другой стороны, создает проблемы при построении таких систем – нельзя создать единый биометрический портрет среднестатистического пользователя на основании данных одного или нескольких субъектов [12]. Для этого необходима большая база биометрических образов «Свой» и «Чужой», доступная любому пользователю СЗИ при его приобретении. Требования по формированию баз естественных биометрических образов изложены в ГОСТ Р 52633.1-2009 [13]. Практика сбора таких баз уже наблюдается в банковской сфере в рамках единой биометрической системы (ЕБС) [14], которая в дальнейшем может применяться и в других отраслях: например, в здравоохранении, образовании, ритейле, электронной коммерции, для получения государственных услуг [15].

С учетом того, что достижения в области биометрической идентификации практически находятся на пике своего развития и могут всецело удовлетворить требования современного общества, можно утверждать, что современные технологии и процесс нормативно-правового регулирования в данной сфере идут нога в ногу.

Заключение

Технология гибридного документооборота является перспективным решением проблем существующего смешанного документооборота. Во-первых, обеспечивается достаточный уровень безопасности и аутентичности документа за счет применения биометрических образов для формирования ЭП, исключающих угрозы антропогенного характера при несоблюдении парольной политики; во-вторых, предусмотрена возможность использования одних и тех же реквизитов (ЭП) документа в цифровой и аналоговой форме его представления. Последнее вызывает ряд вопросов об юридической значимости такого документа. Одним из вариантов решения является приравнивание цифровой рукописной подписи, введенной на планшете и перенесенной на документ, равнозначной обычной физической рукописной подписи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-01204.

Литература

1. Российский рынок СЭД/ЕСМ-систем вырос до 41,6 млрд руб. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.tadviser.ru/Статья:СЭД_\(рынок_России\)](http://www.tadviser.ru/Статья:СЭД_(рынок_России)) (дата обращения: 16.10.2018).
2. Ivanov A.I. A hybrid document formation technology / A.I. Ivanov, P.S. Lozhnikov, A.E. Samotuga // Cybernetics and Systems Analysis. – 2014. – Vol. 50, No. 6. – P. 956–959.
3. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах

персональных данных (Выписка): утв. ФСТЭК РФ 15.02.2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/379-bazovaya-model-ugroz-bezopasnosti-personalnykh-dannykh-pri-ikh-obrabotke-v-informatsionnykh-sistemakh-personalnykh-dannykh-vypiska-fstek-rossii-2008-god> (дата обращения: 18.10.2018).

4. Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных: утв. ФСТЭК 14.02.2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/380-metodika-opredeleniya-aktualnykh-ugroz-bezopasnosti-personalnykh-dannykh-pri-ikh-obrabotke-v-informatsionnykh-sistemakh-personalnykh-dannykh-fstek-rossii-2008-god> (дата обращения: 18.10.2018).

5. Ложников П.С. Биометрическая защита гибридного документооборота. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 148 с.

6. Оценка идентификационных возможностей биометрических признаков от стандартного периферийного оборудования / В.И. Васильев, С.С. Жумажанова, П.С. Ложников, А.Е. Сулаво // Вопросы защиты информации. – 2016. – № 1 (112). – С. 12–20.

7. Иванов А.И. Нейросетевая защита конфиденциальных биометрических образов гражданина и его личных криптографических ключей. – Пенза: ПНИЭИ, 2014. – 57 с.

8. Ложников П.С. О возможности обеспечения равной защиты документов на бумажном и электронном носителе биометрическими и криптографическими методами (обзор) // Вопросы защиты информации. – 2018. – № 4. – С. 10–19 (В печати).

9. Об электронной подписи: Федер. закон от 06.04.2011 г. № 63-ФЗ, последняя редакция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_112701/ (дата обращения: 20.10.2018).

10. Гражданский кодекс Российской Федерации. – Ч. 1: Федер. закон от 30 нояб. 1994 г. № 51-ФЗ (в ред. от 30 дек. 2012 г.; с изм. и доп. от 22 июня 2017 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5142/ (дата обращения: 20.10.2018).

11. Method of protecting paper and electronic text documents through a hidden biometric identifier based on a signature / P.S. Lozhnikov, A.E. Sulavko, A.V. Eremenko, D.A. Volkov // X International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines» (Dynamics), 15–17 November, 2016, Omsk, Russia. P. 1–5. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819037.

12. Фунтиков В.А. Проблемы, возникающие при тестировании и сертификации высоконадежных биометрических средств / В.А. Фунтиков, А.Ю. Малыгин, Ю.И. Олейник // Тр. Междунар. симпозиума «Надежность и качество». – 2006. – Т. 1. – С. 15–17.

13. ГОСТ Р 52633.1–2009. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию баз естественных биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. – Введ. 2010–01–01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 25 с.

14. Российские банки начали сбор биометрических данных клиентов // Новости. Известия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iz.ru/761824/2018-07-01/rossiiskie-banki-nachali-sbor-biometricheskikh-dannykh-klientov> (дата обращения: 20.10.2018).

15. Об утверждении порядка обработки, включая сбор и хранение, параметров биометрических персональных данных в целях идентификации, порядка размещения и обновления биометрических персональных данных в единой биометрической системе, а также требований к информационным технологиям и техническим средствам, предназначенным для обработки биометрических персональных данных в целях проведения идентификации: приказ Минкомсвязи России от 25.06.2018 № 321 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/71985302/> (дата обращения: 20.10.2018).

Ложников Павел Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. комплексной защиты информации» (КЗИ) Омского государственного технического ун-та (ОмГТУ)
Мира пр-т, д. 11, г. Омск, Россия, 644050
ORCID 0000-0001-7878-1976
Тел.: +7 (381-2) 62-87-07
Эл. почта: lozhnikov@mail.ru

Жумажанова Самал Сагидуллоевна

Аспирант, ассистент каф. КЗИ ОмГТУ
Мира пр-т, д. 11, г. Омск, Россия, 644050
ORCID 0000-0002-6785-5201
Тел.: +7-950-216-89-79
Эл. почта: samal_shumashanova@mail.ru

Lozhnikov P.S., Zhumazhanova S.S.

On threats to the security of restricted information in mixed document flow and legal regulation in the application of digital signatures with biometric activation

The article describes the issue of introducing hybrid document management technology and the need to make appropriate changes to the regulatory base of the Russian Federation. A preliminary estimate of the scale of such changes is given. A model of the intruder and actual threats to the security of information in mixed document management systems has been built, and ways of neutralizing the identified threats by hybrid workflow mechanisms are indicated.

Keywords: mixed document flow, biometric identification, electronic signature, hybrid document flow, threat model.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-35-43

References

1. The Russian market for EDS/ECM-systems has grown to 41.6 billion rubles // TAdviser.ru [Electronic resource]. Available at: <http://www.tadviser.ru/Article:CED> (Russian) (accessed: October 16, 2018) (in Russ.).

2. Ivanov A.I., Lozhnikov P.S., Samotuga A.E. A hybrid document formation technology. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 956–959.

3. The basic model of threats to the security of personal data processed in the information systems of personal data (Extract): FSTEC of the Russian Federation 15.02.2008 [Electronic resource]. Available at: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/379-bazovaya-model-ugroz-bezopasnosti-personalnykh-dannykh-pri-ikh-obrabotke-v-informatsionnykh-sistemakh-personalnykh-dannykh-vypis-ka-fstek-rossii-2008-god> (accessed: October 18, 2018) (in Russ.).

4. Methods for determining the actual threats to the security of personal data processed in the information systems of personal data: FSTEC of the Russian Federation 14.02.2008 [Electronic resource]. Available at: <https://fstec.ru/tekh-nicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/380-metodika-opredeleniya-aktualnykh-ugroz-bezopasnosti-personalnykh-dannykh-pri-ikh-obrabotke-v-informatsionnykh-sistemakh-personalnykh-dannykh-fstek-rossii-2008-god> (accessed: October 18, 2018) (in Russ.).
5. Lozhnikov P.S. Biometricheskaya zashchita gibridnogo dokumentooborota [Biometric protection of hybrid workflow]. SB RAS Publ., 2017. 130 p.
6. Vasilyev V.I., Zhumazhanova S.S., Lozhnikov P.S., Sulavko A.E. Identification possibilities assessment of biometric features from standard peripheral equipment. *Information protection issues*, 2016, no. 1 (112), pp. 12–20 (in Russ.).
7. Ivanov A.I. Neyrosetevaya zashchita konfidentsial'nykh biometricheskikh obrazov grazhdanina i yego lichnykh kriptograficheskikh klyuchey. Monografiya [Neural network protection of confidential biometric images of a user and his personal cryptographic keys. Monograph]. Penza: PNIEI, 2014. 57 p.
8. Lozhnikov P.S. On the possibility of equal protection providing for documents in paper and electronic form using biometric and cryptographic methods (Review). *Information security question*, 2018, no. 4, pp. 10–19 (in Press.).
9. On electronic signature: federal law from 06.04.2011 No. 63-FZ (last revised) [Electronic resource]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_112701/ (accessed: October 20, 2018) (in Russ.).
10. Civil Code of the Russian Federation. Part 1: federal law from 21.10.94 No. 51-FZ (last edition) [Electronic resource]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5142/ (accessed: October 20, 2018) (in Russ.).
11. Lozhnikov P.S., Sulavko A.E., Eremenko A.V., Volkov D.A. Method of protecting paper and electronic text documents through a hidden biometric identifier based on a signature. X International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines» (Dynamics), 15–17 November, 2016, Omsk, Russia. pp. 1–5. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819037.
12. Funtikov V.A., Malygin A.Yu., Oleinik Yu.I. Problems arising from testing and certification of highly reliable biometrics. Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality», 2006, vol. 1, pp. 15–17 (in Russ.).
13. GOST R 52633.1–2009 Information protection. Information protection technology. Requirements for creation procedures for bases of natural biometric images, intended for high-reliability biometric authentication means testing. Intr. 2010-01-01. M.: Standartinform. 2010, 25 p. (in Russ.).
14. Russian banks began collecting customers' biometric data // News. Izvestia [Electronic resource]. Available at: <https://iz.ru/761824/2018-07-01/rossiiskie-banki-nachali-sbor-biometricheskikh-dannykh-klientov> (accessed October 20, 2018).
15. On the approval of the processing procedure, including the collection and storage, parameters of biometric personal data for identification purposes, the order of placement and updating of biometric personal data in a single biometric system, as well as the requirements for information technologies and technical means processing of biometric personal data for identification purposes: the order of the Ministry of Communications and Mass Media of Russia from 25.06.2017 No. 321 [Electronic resource]. Available at: <http://base.garant.ru/71985302/> (accessed: October 20, 2018) (in Russ.).

Pavel S. Lozhnikov

PhD, Associate Professor, Head of Department «Complex Information Protection» (CIP) of Omsk State Technical University (OmSTU) 11, Mira pr., Omsk, Russia, 644050
ORCID 0000-0001-7878-1976
Phone: +7 (381-2) 62-87-07
Email: lozhnikov@mail.ru

Samal S. Zhumazhanova

Postgraduate student, Assistant at Department «Complex Information Protection» (CIP) of Omsk State Technical University (OmSTU) 11, Mira pr., Omsk, Russia, 644050
ORCID 0000-0002-6785-5201
Phone: +7-950-216-89-79
Email: samal_shumashanova@mail.ru

УДК 004.732

С.Ю. Исхаков, А.Ю. Исхаков, А.А. Шелупанов

Алгоритм применения краткосрочного прогнозирования для выявления инцидентов информационной безопасности посредством анализа сетевого трафика

Представлены материалы по расширению методического аппарата выявления инцидентов информационной безопасности путем применения методов визуализации к данным, полученным в результате использования краткосрочного прогнозирования. Рассмотрены способы повышения точности прогнозирования поведения сетевого трафика за счет автоматизации определения области допустимых значений и применения механизмов варьирования доверительных интервалов. Авторами представлен алгоритм применения метода Хольта–Винтерса для анализа сетевого трафика, позволяющий выявлять нетипичное поведение сетевых инфраструктур и своевременно обнаруживать инциденты. Существенным дополнением к алгоритму является предложенный механизм визуализации, применение которого обеспечивает возможность интерпретации полученных данных. При этом визуализация данных рассматривается как средство совершенствования методов управления инцидентами, поскольку информация о состоянии защищенности телекоммуникационной инфраструктуры может быть использована для обнаружения причин возникновения инцидентов и их расследования. Предложены варианты ускорения адаптации к реальным объектам сетевой инфраструктуры полученных моделей с помощью подбора коэффициентов, что позволяет снизить промежуток времени и объем данных, необходимые для начала формирования прогнозных значений. Рассмотрен лабораторный стенд и представлены результаты проведенных экспериментов, сформулированы основные преимущества предложенного подхода и выявленные технологические ограничения, что позволило определить задачи для следующих этапов исследования, в том числе проведения экспериментов по применению правил, ограничивающих глубину корреляции, для повышения стабильности работы и скорости поиска при больших объемах обрабатываемых данных.

Ключевые слова: алгоритм, краткосрочное прогнозирование, инцидент, сетевой трафик, визуализация.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-44-50

Повсеместное применение сетевых технологий приводит не только к расширению возможностей инфокоммуникаций, но и к появлению новых угроз и векторов атак злоумышленников. При этом трафик, генерируемый пользователями корпоративных сервисов, является одним из наиболее полных и независимых источников информации о процессах, происходящих в ИТ-инфраструктуре предприятия, а результаты его анализа могут позволить получать информацию о протекании бизнес-процессов. Решение задачи по контролю и анализу сетевого трафика сопряжено с рядом важных аспектов в части анализа комбинаций запросов к различным сервисам, а также анализа состояния сегментов локальной сети и магистральных каналов связи. Большинство исследований в области анализа сетевого трафика, например [1–4], относятся к узким предметным областям и посвящены изучению трафика определенных классов. Однако характер сетевой активности различных пользователей и сервисных приложений имеет гетерогенную природу, поэтому применимость для анализа трафика некоторого единого метода на основе выделения устойчивых фрагментов и формирования шаблонов или пороговых значений, не представляется перспективным решением задачи.

По мнению авторов, наиболее актуальным подходом к анализу поведения сетевого трафика для выявления нетипичного поведения объектов инфраструктур, свидетельствующего о наступлении инцидентов информационной безопасности, является развитие алгоритмического аппарата по примене-

нию и адаптации методов краткосрочного прогнозирования, поскольку они позволяют выявлять тренды, относящиеся к коротким периодам, что позволяет делать краткосрочные прогнозы и повысить точность выявления инцидентов.

Кроме того, актуальным на сегодняшний день направлением в решении обозначенной задачи является развитие методических и практических наработок в части использования средств визуализации для совершенствования методов управления инцидентами. В статье также предлагаются механизмы расширения методического аппарата путем применения методов визуализации к данным, полученным в результате использования краткосрочного прогнозирования для выявления инцидентов информационной безопасности, поскольку информация о состоянии защищенности сетевой инфраструктуры может быть использована для обнаружения инцидентов, а также их расследования и принятия решений.

Экспоненциальное сглаживание временных рядов

Гетерогенная природа сетевого трафика и наличие нестационарных изменений обуславливают тот факт, что в процессе выявления инцидентов информационной безопасности наибольшую практическую ценность будут иметь краткосрочные прогнозы значений исследуемых параметров при условии, что глубина упреждения находится в рамках эволюционного периода. В [5–7] рассмотрены классификация методов прогнозирования и подходы к их применению в процессе выявления инцидентов и уста-

новлено, что основными преимуществами метода Хольта–Винтерса в рамках рассматриваемой задачи являются минимальный период определения трендов и возможность их учета при составлении прогнозных значений на следующие моменты времени. На текущем этапе исследования рассмотрены варианты применения этого метода совместно с механизмом визуализации на базе аналитической поисковой системы Elasticsearch [8].

При использовании вышеуказанного метода временной ряд представляется в виде суммы базовой компоненты, тренда и компонента сезонности, к каждому из которых применяется экспоненциальное сглаживание. Предполагается, что все компоненты изменяются во времени, а под периодом понимается единица временного ряда. При этом в (1) компонент сезонности за прошлый наблюдаемый период обозначен как c_{x+1-D} :

$$\hat{y}_{x+1} = a_x + b_x + c_{x+1-D}, \quad (1)$$

где \hat{y}_{x+1} – прогноз на следующий период; x – текущий период; a_x – базовый компонент; b_x – тренд; c_x – компонент сезонности; D – длина сезона (в периодах).

Определение начальных значений компонент осуществляется в соответствии с формулами (2). При этом в случае с базовым компонентом оно является равным среднему арифметическому для первого сезона наблюдений:

$$a_0 = \sum_{x=1}^D \frac{y_x}{D}, \quad (2)$$

$$b_0 = \frac{1}{D} \left(\frac{y_{x=1} - y_1}{D} + \frac{y_{x=2} - y_2}{D} + \dots + \frac{y_{D+D} - y_D}{D} \right),$$

$$c_0 = y_1 - a_0,$$

где y_x – значение наблюдаемого параметра в текущий период.

Согласно (3) для получения прогнозируемого значения параметра с третьего периода к текущему значению необходимо применить коэффициенты α , β , γ , изменяющиеся в интервале (0,1). Применение этих коэффициентов позволяет распределить влияние на прогноз между текущим и предшествующим значением:

$$a_x = \alpha(y_x - c_{x-D}) + (1-\alpha)(a_{x-1} + b_{x-1}), \quad (3)$$

$$b_x = \beta(a_x - a_{x-1}) + (1-\beta)b_{x-1},$$

$$c_x = \gamma(y_x - a_x) + (1-\gamma)c_{x-D}.$$

В методических указаниях по выбору α , β , γ , например работы [4, 7, 10], определено, что возможность адаптировать прогноз за короткий промежуток времени достигается с помощью как минимум одного коэффициента. В проводимом исследовании для этой цели наилучшим образом подходит базовый компонент, поскольку γ определяет вклад сезонности, а β необходим для выявления линии тренда, которая изменяется медленнее других компонентов. При этом β следует выбирать так, чтобы сезон не составлял большую часть веса сглаживания.

Для выявления инцидента следует формировать прогноз на основе оценки предыдущих значений исследуемых показателей сетевого трафика и сравнивать его с текущим значением. Определение отклонений в поведении временных рядов может быть организовано путем проверки для каждой точки временного ряда вхождения этого значения в доверительный интервал, представленный в виде области допустимых значений.

В исследованиях [5–7, 9] показано, что при решении подобных задач применение четко определенных критериев и допустимых значений обуславливает высокую вероятность ошибок первого рода. Как было упомянуто ранее, гетерогенная природа трафика телекоммуникационных сетей обуславливает необходимость механизма варьирования области допустимых значений вместо применения четко определенных шаблонов и пороговых значений. В данной работе предлагается определять отклонения в тренде только после выявления определенного количества значений, не входящих в границы доверительного интервала, рассчитанного для данного момента времени.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что поскольку наблюдение за различными параметрами сетевого трафика позволяет получать необходимые для применения метода Хольта–Винтерса временные ряды, а возможности этого метода позволяют выявлять краткосрочные тренды, то данный метод может быть использован для прогнозирования изменений параметров объектов сетевой инфраструктуры. Предложенный подход основан на сравнении ранее наблюдаемых значений с прогнозными значениями на текущий период, при том, что сравнение проводится на основе области допустимых значений, границы которых определяются для каждого вновь получаемого значения контролируемого параметра.

Алгоритм анализа сетевого трафика с помощью краткосрочного прогнозирования

Таким образом, в результате мониторинга параметров трафика между различными объектами сетевой инфраструктуры можно формировать временные ряды. Применение к таким рядам методов прогнозирования позволяет выявить тренды и отклонения в них, а полученные в результате данные могут быть обработаны аналитической поисковой системой Elasticsearch. Каждое наблюдаемое значение, выходящее за пределы доверительного интервала на данный период, помечается как факт сбоя в работе. К инциденту же относится факт превышения допустимого количества сбоев в пределах «плавающего окна». Данные о значениях контролируемых параметров помещаются в хранилище, а их расположение внутри хранилища определено созданными моделями объектов инфраструктуры. На рис. 1 представлен алгоритм анализа сетевого трафика, основанный на методе Хольта–Винтерса и позволяющий выявлять инциденты информационной безопасности посредством анализа сетевого трафика в рамках контроля параметров на исследуемом объекте.

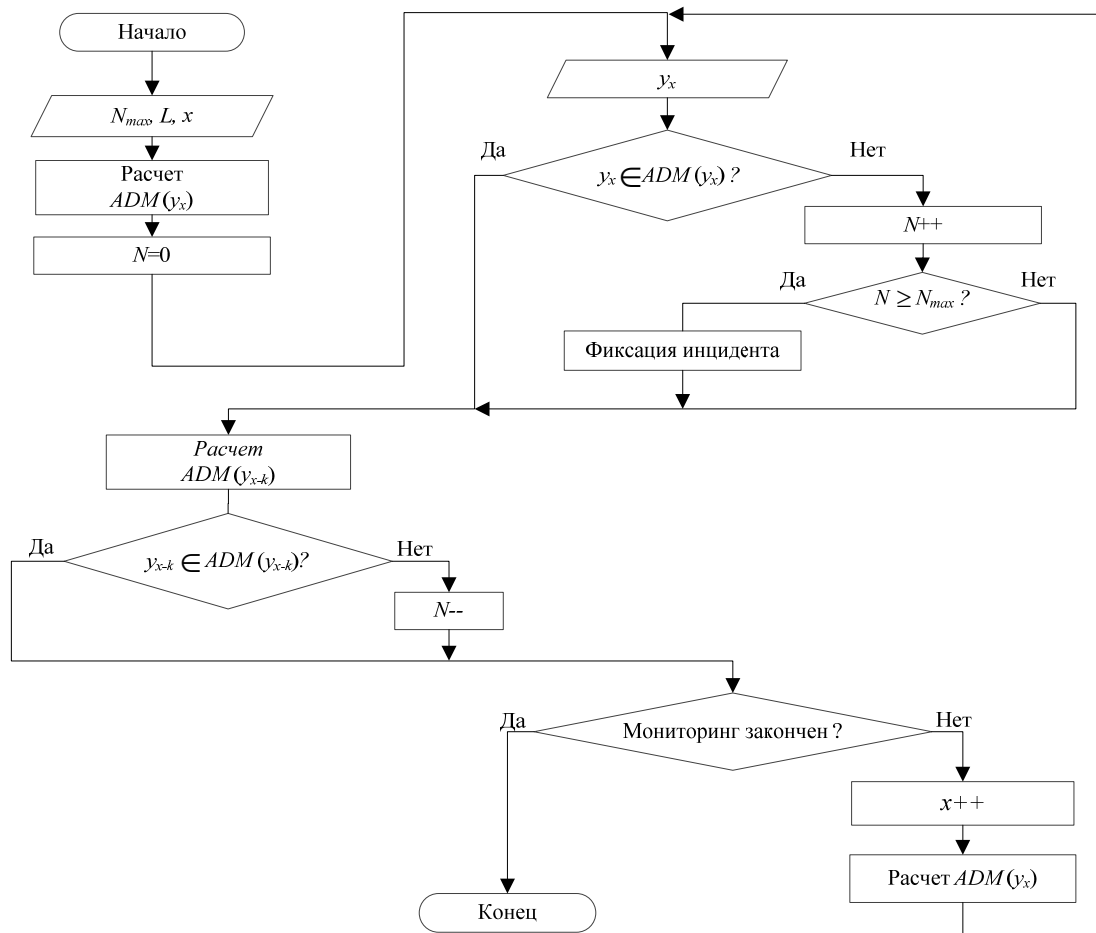


Рис. 1. Алгоритм анализа сетевого трафика с помощью метода Хольта–Винтерса

Каждое новое значение перед помещением в хранилище сравнивается с прогнозированным на данный момент времени значением с учетом допускаемых отклонений. Если значение не укладывается в допустимый интервал возможных значений, увеличивается счетчик отклонений. После этого определяется состояние счетчика, и в случае превышения порога фиксируется инцидент. Затем заново рассчитываются коэффициенты, прогнозируемое значение и доверительный интервал. Используемые на рис. 1 обозначения представлены ниже.

- 1) L – величина «плавающего окна», $K \leq S$;
- 2) S – количество периодов наблюдения, составляющих один сезон;
- 3) N_{\max} – максимальное число отклонений для определения момента фиксации инцидента;
- 4) N – счетчик числа отклонений;
- 5) $ADM(y_x)$ – область допустимых значений, определенная для y в момент времени x .

Рассмотренные выше ограничения обуславливают возможность применения алгоритма не ранее чем с третьего сезона наблюдения. Помимо непосредственного определения инцидентов, необходимо обеспечить механизм выявления причины его возникновения для адекватной реакции и проведения расследования, например, в случае резкого снижения объема трафика необходимо выяснить причину. Наступлению каждого инцидента предшествуют

различные события: сканирование сетевых ресурсов, попытки установить соединение, подозрительные вложения в почтовом трафике. Визуализация данных, полученных в ходе применения вышеизложенного алгоритма, позволяет объединить и группировать их для определения причины возникновения инцидента.

Визуализация данных как средство совершенствования методов управления инцидентами

Возможность визуализации информации о событиях и инцидентах в сетевой инфраструктуре позволяет не только реализовать новую форму представления данных, но и обеспечить механизмы их интерпретации и последующего принятия решений в отношении необходимости оперативной корректировки деятельности по реагированию на инциденты.

В [7, 9, 11] представлены подходы к формализации данной задачи, в [10] предложена методика для визуализации данных о состоянии топологии сетей различного масштаба. Основным недостатком данного методического обеспечения является направленность на визуальное представление топологии сети и состояния сетевых объектов (хостов). Ниже приведен предлагаемый механизм визуализации данных, полученных в результате применения методов краткосрочного прогнозирования к временным рядам, сформированным на основе контроля трафика сетевой инфраструктуры.

Шаг 1. Определение и выбор ИТ-активов, являющихся источниками данных в рамках конкретной решаемой задачи. Для каждого ИТ-актива, используемого в конкретной задаче необходимо определить механизмы транспорта информации о параметрах трафика (интерфейсы и протоколы взаимодействия).

Шаг 2. Провести анализ параметров с целью выделения тех, которые имеют практическую ценность для обнаружения инцидентов.

Шаг 3. В соответствии с рассмотренными выше методами разработать сбор информации и применение к ней краткосрочного прогнозирования.

Шаг 4. В соответствии с рассмотренными выше методами определить необходимость и разработать способы агрегации сообщений, определенных на шаге 3. В случае отсутствия необходимости агрегации для конкретного типа сообщений данный шаг может быть пропущен.

Шаг 5. Основываясь на рассмотренном выше алгоритме, организовать получение анализа сетевого трафика и формирование данных о сбоях и инцидентах, поскольку именно они будут являться данными, подлежащими визуализации. При этом необходимо определить принципиальные схемы событий, описывающих инциденты (определить субъекты, объекты и производимые действия).

Шаг 6. Обеспечить накопление событий и записей об инцидентах в хранилище, обеспечивающем возможность работы с большими данными и предоставляющем функции поиска, в том числе поиска с нечеткими условиями.

Шаг 7. Определить возможные для использования графические модели [10] и скорректировать их с учетом сценария работы сети. При определении моделей возможно использование критериев эффективности восприятия подсистемы визуализации [10].

Шаг 8. В соответствии с определенными на шаге 7 моделями реализовать визуализацию данных об инцидентах, извлекаемых из хранилища с помощью средств поиска, с использованием программных компонентов или отдельных продуктов.

Для практической реализации предложенного авторами механизма необходимо решить проблемы обработки больших данных. В [8, 12] представлены обзоры рынка современных решений в области визуализации данных, среди которых стоит отметить Elasticsearch. Это свободно распространяемая поисковая система с распределенным аналитическим ядром. Используется в составе с Logstash [8] и Kibana [Там же]. Для взаимосвязи компонентов используется платформа RabbitMQ [Там же]. На основании данных обзоров на текущем этапе исследований был выбран вышеуказанный продукт, основными преимуществами которого являются поддержка кластерной архитектуры (планируется к реализации на следующих этапах работы), централизованное хранение данных и возможность полнотекстового поиска в реальном времени по большим объемам разнотипных структур.

На базе стационарного компьютера был развернут стенд, имеющий следующие характеристики: 4-ядерный процессор с тактовой частотой 3,1 ГГц; 16 Гб ОЗУ, на котором установлен стек ELK в составе: Elasticsearch 6.2.0, Logstash 6.2.0, Kibana 6.2.0. Стенд был развернут на базе операционной системы CentOS 7. Скорость индексирования в Elasticsearch составила 15000 пакетов в секунду при средней загрузке каждого из ядер процессора 50%. Однако поскольку основной целью эксперимента была оценка времени поиска среди индексированных данных, были предприняты попытки отправки запросов в Elasticsearch. Среднее время поиска составило 1,02 мс при длине запроса 6 символов. На рис. 2 представлен пример визуализации данных.

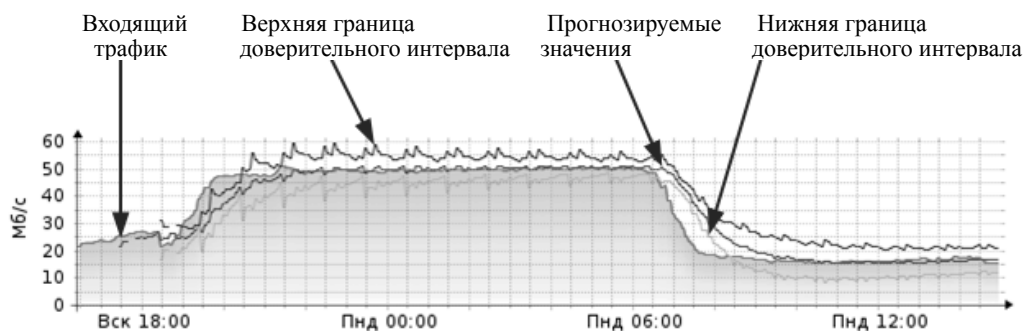


Рис. 2. Пример визуализации данных использования метода Хольта-Винтерса для анализа загруженности одного из сетевых интерфейсов на маршрутизаторе с применением механизма доверительных интервалов

Несмотря на достигнутые результаты в части поиска данных, были выявлены следующие проблемы при обработке данных. Во-первых, стек ELK критичен к ошибкам типа «OutOfMemory» [14, 15], что приводит к частым перебоям в ходе его использования. Во-вторых, высокая скорость поиска в больших объемах данных сопровождается низким коэффициентом восстановления работоспособности

в случае перебоев, что зачастую приводит к безвозвратной потере данных.

Одним из наиболее практичных подходов является применение правил, ограничивающих глубину корреляции и разделение базы событий на онлайн- и архивную части. Например, события, произошедшие за последние сутки, хранятся в онлайн-базе, по истечении таймера помещаются в архивную часть. Для

работы с большим объемом данных применяются различные специализированные поисковые движки и инструменты визуализации.

На следующих этапах исследования будут проведены эксперименты по повышению стабильности работы и сохранности обрабатываемых данных. В некоторых публикациях [8, 10, 16] представлены данные смежных экспериментов. Ниже рассмотрены попытки сравнить полученные данные.

1. Аппаратные ресурсы. В большинстве рассмотренных примеров [10] используется распределение нагрузки на потоки в кластере из нескольких узлов (серверов). В данном случае использовались виртуальные машины на базе одного физического стенда, характеристики которого указаны выше.

2. Скорость индексирования и анализа используемых данных. В связи с невозможностью проведения экспериментов при равных условиях на идентичном оборудовании [8] проведение какой-либо количественной оценки по данному параметру не представляется возможным. Однако такие сравнения, вероятно, будут проведены на следующих этапах исследования.

3. Механизм обработки данных. В эксперименте, как и в большинстве смежных исследований [8, 10], применялась потоковая обработка.

4. Пул задач. Все рассмотренные задачи в смежных исследованиях имеют конкретную постановку, и получить результаты их сравнения в численном виде не представляется возможным. Однако на следующем этапе исследования будет возможно применение предлагаемого методического обеспечения для решения различных задач и получения количественных оценок будущих результатов.

Заключение

В ходе исследования разработан алгоритм применения метода Хольта–Винтерса для анализа сетевого трафика с целью выявления нетипичного поведения сетевых инфраструктур и обнаружения инцидентов информационной безопасности. В дополнение к этому алгоритму предложен механизм визуализации полученных данных для обеспечения возможности их интерпретации и принятия решений по выявлению причин и расследования инцидентов.

Среди достоинств предлагаемого подхода можно выделить регулярную корректировку критериев на основе предыдущих наблюдений и возможность выявления корреляций между не связанными между собой, на первый взгляд, значениями параметров контролируемых объектов. Кроме того, в процессе наблюдения допускается корректировка всех коэффициентов, что позволяет обеспечить требуемый уровень адекватности моделей. Ограничение в части требования накопления данных перед построением прогнозных значений в решении практических задач нивелируется исходя из принципов функционирования современных телекоммуникационных сетей, а также объемов и скорости передачи данных в них.

Предложенный механизм визуализации данных является обобщением методических и практических разработок авторов в части организации сбора и об-

работки данных о состоянии сетевой инфраструктуры для выявления инцидентов информационной безопасности. При этом визуализация данных предлагается к использованию в качестве средства совершенствования методов управления инцидентами, поскольку информация о состоянии защищенности инфраструктуры может быть использована для обнаружения причин возникновения инцидентов и их расследования.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-47-700350 п_а).

Литература

1. Легков К.Е. Проведение экспериментов по сбору трафика и моделированию методики оценки изменения качества информационного обмена в инфокоммуникационной системе специального назначения // Т-Comm. – 2014. – № 5. – С. 36–44.
2. Шелухин О.И. Сравнительный анализ характеристик обнаружения аномалий трафика методами крупномасштабного анализа / О.И. Шелухин, А.В. Панкрушин // Т-Comm. – 2014. – № 6. – С. 65–69.
3. Моделирование информационной безопасности на основе многомерных матриц / А.Н. Громов, А.П. Тиунов, М.С. Фоменко, В.Г. Шахов // Омский научный вестник. – 2015. – № 2 (140). – С. 212–215.
4. Iskhakova A. Analysis of the vulnerabilities of the embedded information systems of IoT-devices through the honeypot network implementation / A. Iskhakova, R. Meshcheryakov, A. Iskhakov, S. Timchenko // Proceedings of the IV International research conference information technologies in science, management, social sphere and medicine (ITSMSSM 2017). – 2017. – Vol. 72. – P. 363–367.
5. Aberrant Behavior Detection in Time Series for Network Monitoring [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.usenix.org/legacy/publications/library/proceedings/lisa2000/full_papers/brutlag/brutlag_html/index.html свободный (дата обращения: 23.11.2018).
6. Исхаков С.Ю. Прогнозирование в системе мониторинга локальных сетей / С.Ю. Исхаков, А.А. Шелупанов, С.В. Тимченко // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1 (25), ч. 2. – С. 100–103.
7. Soni R.S. Inventory forecasting model using genetic programming and Holt-Winter's exponential smoothing method / R.S. Soni, D. Srikanth // 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), 2017. – 2017. – P. 2086–2091.
8. Проноза А.А. Математические модели визуализации в SIEM-системах / А.А. Проноза, А.А. Чечулин, И.В. Котенко // Труды СПИИ РАН. – 2016. – № 46 (3). – С. 90–107.
9. Kalekar P.S. Time series Forecasting using Holt-Winters Exponential Smoothing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://labs.omniti.com/people/jesus/papers/holtwinters.pdf> (дата обращения 04.12.2018).
10. Милославская Н.Г. Визуализация информации при управлении информационной безопасностью информационной инфраструктуры организации / Н.Г. Милославская, А.И. Толстой, А.И. Бирюков // Научная визуализация. – 2014. – № 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sv-journal.org/2014-2/06/ru/index.php?lang=ru>, свободный (дата обращения: 04.12.2018).
11. Семёнов Д.П. Визуализация процессов информационной безопасности // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 2, № 13. – С. 230–232.

12. Корреляция SIEM. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/analytics/431459.php> (дата обращения: 23.11.2018).

13. Буйневич М.В. Способ визуализации модулей системы обеспечения информационной безопасности / М.В. Буйневич, В.В. Покусов, К.Е. Израйлов // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. – 2018. – № 3. – С. 81–90.

14. Abomhara M. Cyber security and the internet of things: vulnerabilities, threats, intruders and attacks / M. Abomhara, G.M. Kien // Journal of Cyber Security. – 2015. – Vol. 4. – P. 65–88.

15. Bajer M. Building an IoT Data Hub with Elasticsearch, Logstash and Kibana // 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (Fi-CloudW). – 2017. – P. 63–68.

16. Son S.J. Performance of ELK stack and commercial system in security log analysis / S.J. Son, Y. Kwon // IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC), 2017. – 2017. – P. 187–190.

Исхаков Сергей Юнусович

Канд. техн. наук, доцент каф. безопасности информационных систем (БИС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Красноармейская ул., 146, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29
Эл. почта: iskhakov.sy@gmail.com

Исхаков Андрей Юнусович

Канд. техн. наук, доцент каф. БИС ТУСУРа Красноармейская ул., 146, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29
Эл. почта: iskhakovandrey@gmail.com

Шелупанов Александр Александрович

Д-р техн. наук, профессор, ректор ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 51-05-30
Эл. почта: rector@tusur.ru

Iskhakov S.Y., Iskhakov A.Y., Shelupanov A.A.

Algorithm for applying short-term forecasting for detecting information security incidents through the network traffic analysis

This article is devoted to the expansion of the methodological apparatus for identifying information security incidents by applying visualization methods to data obtained as a result of the use of short-term forecasting. Ways to improve the accuracy of predicting the behavior of network traffic by automating the determination of the range of acceptable values and using the mechanisms of varying confidence intervals are considered. The authors presented an algorithm for applying the Holt-Winters method for analyzing network traffic, which makes it possible to identify the atypical behavior of network infrastructures and detect incidents in a timely manner. At the same time, data visualization is considered as a means of improving incident management methods, since information on the security status of the telecommunications infrastructure

can be used to detect the causes of incidents and investigate them. Options have been proposed for accelerating adaptation to real objects of the network infrastructure of the models obtained using selection of the coefficients of influence of the components, which makes it possible to reduce the time interval and the amount of data necessary to start the formation of predicted values. The laboratory bench was considered and the results of the experiments were presented, the main advantages of the proposed approach and the identified technological limitations were formulated, which allowed defining tasks for the next stages of the study, including conducting experiments on the application of rules limiting the depth of correlation, to increase the stability and speed of searching for large volumes of data processed.

Keywords: algorithm, short-term forecasting, incident, network traffic, visualization.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-44-50

References

1. Legkov K.E. Conduct experiments on the collection and traffic modeling methodology for assessing changes in the quality of information exchange in the infocommunication system of special purpose. *T-Comm*, 2014. no. 5, pp. 36–44 (in Russ).

2. Sheluhin O.I., Pankrushin A.V. The comparative analysis of characteristics of network traffic's anomalies detection with methods of wavelet analysis. *T-Comm*, 2014, no. 6, pp. 65–69 (in Russ).

3. Gromov A.N., Tiunov A.P., Fomenko M.S., Shakhov V.G. Modeling information security based on multidimensional matrices. *Omsk scientific bulletin*, 2015, no. 2, pp. 212–215 (in Russ).

4. Iskhakova A., Meshcheryakov R., Iskhakov A., Timchenko S. Analysis of the vulnerabilities of the embedded information systems of IoT-devices through the honeypot network implementation. *Proceedings of the IV International research conference information technologies in science, management, social sphere and medicine (ITSMSSM 2017)*, 2017, vol. 72, pp. 363–367. 2017 (in Russ).

5. Brutlag J. Aberrant Behavior Detection in Time Series for Network Monitoring. *Proceedings of 14th Systems Administration Conference*. Available at: http://www.use-nix.org/events/lisa00/full_papers/brutlag/brutlag_html/index.html (accessed: November 20, 2018).

6. Iskhakov S.Y., Shelupanov A.A., Timchenko S.V. Forecasting in the system of LAN monitoring. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, vol. 1, no. 2, pp. 100–103 (in Russ.).

7. Soni R.S., Srikanth D. Inventory forecasting model using genetic programming and Holt-Winter's exponential smoothing method. *2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2017, pp. 2086–2091.

8. Pronoza A.A., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Mathematical models of visualization in SIEM systems. *SPIIRAS Proceedings*, 2016, vol. 3, no. 46, pp. 90–107.

9. Kalekar P.S. Time series Forecasting using Holt-Winters Exponential Smoothing. *OmniTI*. Available at: <https://labs.omniti.com/people/jesus/papers/holtwinters.pdf> (accessed: December 04, 2018).

10. Miloslavskaya N.G., Tolstoy A.I., Biryukov A.I. Visualization of information at management of information security of information infrastructure of the organization. *Scientific visualization*, 2014, no. 2 (in Russ). Available at: <http://sv-journal.org/2014-2/06/ru/index.php?lang=ru> (accessed: December 04, 2018).

11. Semenov D.P. Visualization of process of information security. *Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2017, vol. 2, no/ 13, pp. 230–232 (in Russ).

12. Korrelyatsiya SIEM. Available at: <https://www.securitylab.ru/analytics/431459.php> (in Russ). (accessed: November 23, 2018).

13. Buinevich M.V., Pokusov V.V., Izrailov K.E. Method of visualizing the modules of the information security system. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii*. 2018, no. 3, pp. 81–90 (in Russ.).

14. Abomhara M., Kien G.M. Cyber security and the internet of things: vulnerabilities, threats, intruders and attacks. *Journal of Cyber Security*, 2015, vol. 4, pp. 65–88.

15. Bajer M. Building an IoT Data Hub with Elasticsearch, Logstash and Kibana. *5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*, 2017, pp. 63–68.

16. Jon S.J., Kwon Y. Performance of ELK stack and commercial system in security log analysis. *IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, 2017, pp. 187–190.

Sergey Y. Iskhakov

PhD, Assistant Professor of Department of Information Systems Security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 146, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634045
Phone: +7 (382-2) 70-15-29
Email: iskhakov.sy@gmail.com

Andrey Y. Iskhakov

PhD, Assistant professor of Department of Information Systems Security, TUSUR 146, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634045
Phone: +7 (382-2) 70-15-29
Email: iskhakovandrey@gmail.com

Alexander A. Shelupanov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector TUSUR 40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone.: +7 (382-2) 51-05-30
Эл. почта: rector@tusur.ru

УДК 004.054.53

А.С. Голдобина, Ю.А. Исаева, В.В. Селифанов, А.М. Климова, П.С. Зенкин

Построение адаптивной трехуровневой модели процессов управления системой защиты информации объектов критической информационной инфраструктуры

Рассматривается трехуровневая модель процессов управления системой защиты информации на примере объектов критической информационной инфраструктуры. Критические информационные инфраструктуры Российской Федерации во избежание реализации различных инцидентов безопасности нуждаются в постоянном анализе и обновлении правил работы. Авторами был предложен алгоритм, позволяющий делать своевременную выработку решений путём имитации процессов работы систем. Моделирование системы позволяет провести оценку эффективности системы и сделать необходимые предложения по повышению уровня защищенности.

Ключевые слова: трёхуровневая модель, система управления, оценка эффективности, система защиты информации.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-51-58

В связи с появлением новых требований к обеспечению безопасности объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации необходимо обновление правил работы и реагирования систем защиты информации на различные инциденты. Так как объекты критической информационной инфраструктуры представляют собой сложные информационные системы, то эффективность работы системы защиты информации зависит от качества процессов ее управления.

Основное назначение процессов управления – это своевременная выработка и реализация управляющего воздействия на управляемый объект (средства защиты информации, персонал, операционные системы, программное обеспечение и др.). Показателем эффективности является вероятность своевременного принятия и реализации правильного решения.

Одним из наиболее эффективных инструментов, дающих возможность оценки работы системы защиты информации объектов критической информационной инфраструктуры и процессов их управления до принятия решения о реализации конечного варианта технического проекта, является моделирование.

Оно позволяет получить достаточно полное представление о реакции системы защиты на различные ситуации и наглядно демонстрирует ее работу. В процессе моделирования можно увидеть работу каждого объекта в определенный момент времени [17]. Это позволит заранее увидеть и предотвратить нежелательные действия или последствия работы системы с неверными входными данными и позволит избежать значимых экономических потерь [11].

Для оценки работы систем защиты информации объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации была разработана адаптивная трехуровневая имитационная модель, представляет собой однофазную систему массового обслуживания разомкнутого типа с неограниченной

входной емкостью, т.е. без отказов в обслуживании, с ограничением по времени пребывания заявок в системе, определяемым критическим временем длительности цикла управления и абсолютной надежностью.

Рассматриваемая модель имитирует процессы работы систем на предприятии. Модель состоит из потоков данных, поступающих в обработку системы. Такая детализация является важным аспектом разработки характеристик будущих систем или модернизации уже существующих систем защиты информации [21]. Так как работа критической информационной инфраструктуры должна быть постоянной и непрерывной, имитационное моделирование процессов управления позволит построить систему, способную к максимальным нагрузкам, из расчета всех параметров, которые будут указаны в модели.

В процессе работы имитационная модель способна показать, какие места системы не смогут выдержать предполагаемой нагрузки или какие места используются не в полную силу [22]. Данные функции позволяют не только изменять параметры разрабатываемой системы, но и понять, как лучше организовать архитектуру системы.

Анализ нормативной базы в области безопасности критической информационной инфраструктуры, а именно Федерального закона № 187 «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» и приказов ФСТЭК России № 21, 17 и 239, показал, что большинство объектов защиты имеют трехуровневую структуру, где каждый уровень представлен совокупностью объектов управления.

Исходя из анализа примерной структуры объекта исследования и учитывая необходимость минимизации времени реакции системы управления, на изменение принятия решения, целесообразно использовать трехуровневую структуру для построения адаптивной имитационной модели, не исключая нижний уровень ввода (вывода) данных, что с точки зрения управления процессами безопасности увели-

чит эффективность работы модели и физической системы управления [19].

Сама трехуровневая модель представляет собой следующую архитектуру:

- уровень операторского управления или пункты управляющего воздействия (третий уровень);
- уровень автоматического ввода (вывода) данных или автоматизированные пункты управления (второй уровень);
- уровень ввода (вывода) данных исполнительных устройств или пункты приема исходных данных (первый уровень).

Принцип работы трехуровневой архитектуры представлен на рис. 1.

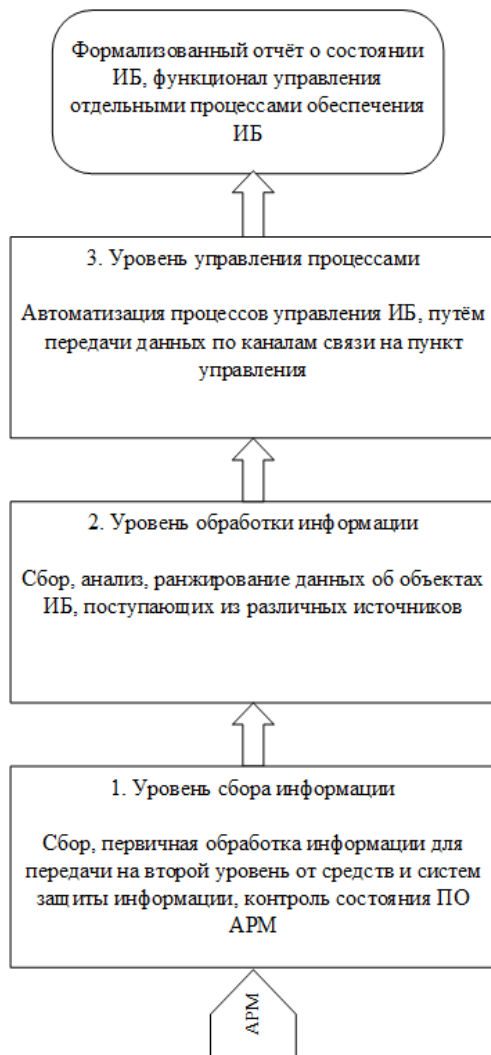


Рис. 1. Принцип работы трехуровневой архитектуры

Трёхуровневая архитектура модели и будущей системы позволит не только наблюдать подробные изменения работы моделируемой системы, но и позволит системе распределять рабочие нагрузки, что приведет к повышению работоспособности системы защиты информации [9].

Исходя из свойств атрибутов безопасности критической информационной инфраструктуры, имитационная модель должна иметь адаптивные свойства, которые обеспечат приспособление моделируемой

системы к новым, измененным свойствам и параметрам. Это позволит изменять характеристики данных, поступающих на вход модели, и регулировать работу имитируемой системы [10].

Алгоритм, вложенный в основу моделирования, заключается в выполнении на пункте управления третьего уровня таких функций управления, как сбор, обработка, анализ, адаптивный выбор порядка доопределения данных и оценки эффективности воздействия [20], доопределение данных об объектах воздействия, оценка возможностей своей группы ТС и принятие решения на осуществление воздействия, а на пункте управления второго уровня – функций доопределения данных об объектах воздействия и оценки эффективности воздействия всех своих ТС на все объекты воздействия [1].

Схема работы трехуровневого алгоритма показана на рис. 2.

Формальная запись действий iD_j алгоритма управления означает i -е действие на j -м уровне управления.

Этот алгоритм позволяет формировать управляющие решения, основываясь на полученных данных, в ходе анализа работы системы защиты информации. Данные, полученные с первого уровня адаптивной двухуровневой имитационной модели, передаются на второй уровень модели, который формирует управляющие воздействия и является пунктом управления.

3D_1 – моделирование (имитация) формирования на пункте управления операторского уровня команд на сбор данных о подчиненных средствах, средствах защиты и сложившейся обстановке;

3D_2 – имитация передачи команд на сбор данных по линиям связи на пункты управления второго уровня автоматического ввода данных;

2D_3 – имитация формирования на ПУ второго уровня автоматического ввода данных базы данных технических средств (ТС) своей группы, средств защиты и сложившейся обстановки;

2D_4 – имитация передачи на ПУ третьего уровня ввода данных исполнительных устройств, данных о ТС своей группы, средствах защиты и сложившейся обстановке;

3D_5 – имитация сбора на ПУ третьего уровня ввода данных исполнительных устройств, данных о состоянии своих групп ТС, средствах защиты и сложившейся обстановке;

3D_6 – имитация формирования базы данных своих групп ТС, средствах защиты и сложившейся обстановке;

3D_7 – имитация анализа данных о своих группах ТС, средствах защиты и сложившейся обстановке на полноту;

3D_8 – имитация ранжирования средств защиты;

3D_9 – имитация оценки возможностей своих групп ТС по осуществлению воздействия на объекты;

${}^3D_{10}$ – имитация распределения проранжированных объектов воздействия между группами ТС в соответствии с их возможностями по осуществлению воздействия;

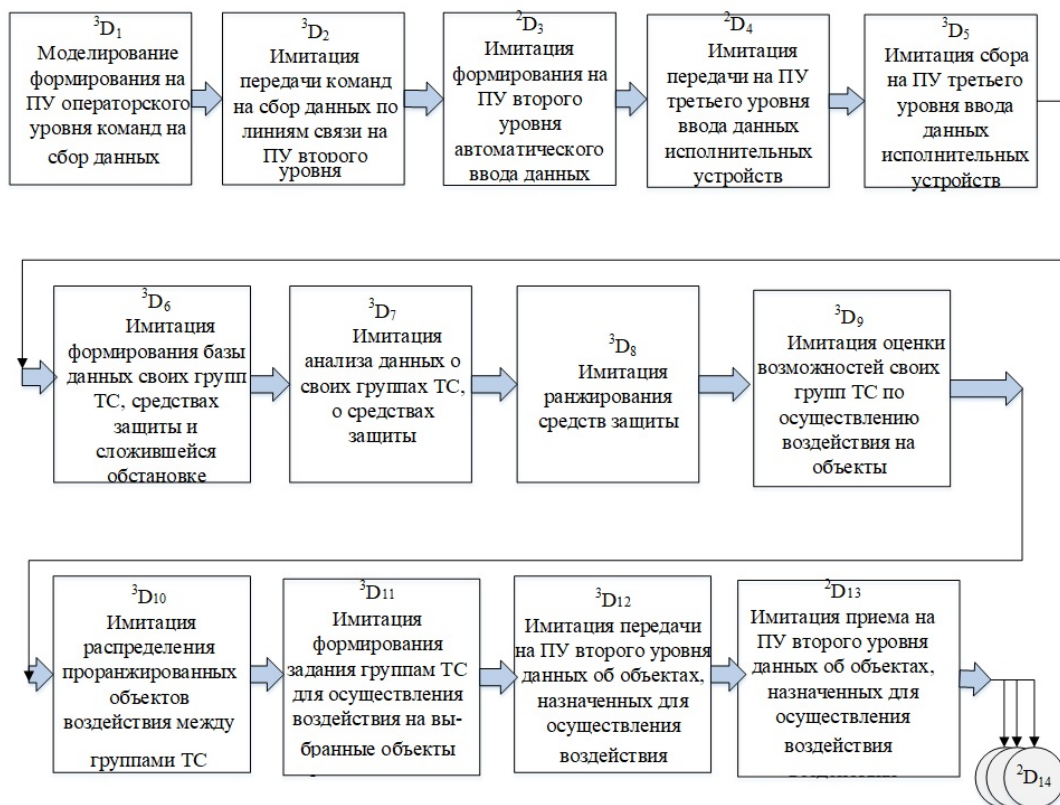


Рис. 2. Схема работы трёхуровневого алгоритма

$^3D_{11}$ – имитация формирования задания группам ТС для осуществления воздействия на выбранные объекты;

$^3D_{12}$ – имитация передачи на пункты управления второго уровня данных об объектах, назначенных для осуществления воздействия;

$^2D_{13}$ – имитация приема на пунктах управления второго уровня данных об объектах, назначенных для осуществления воздействия;

$^2D_{14}$ – имитация анализа данных о ТС своей группы, объектах воздействия и условиях обстановки на полноту;

$^2D_{15}$ – имитация при необходимости доопределения данных об объектах воздействия, включающего следующие действия:

$^2D_{16}$ – имитация распределения объектов воздействия для осуществления доопределения данных между пунктом управления второго уровня и пунктами управления первого уровня, входящими в состав одной группы;

$^2D_{17}$ – при этом проводят имитацию распределения каждого объекта воздействия для доопределения данных о нем на два пункта управления, на одном из которых будет осуществляться непосредственное измерение первичных характеристик, а на другом – удаленное измерение первичных характеристик;

$^2D_{18}$ – имитация доопределения на пункте управления второго уровня данных о выделенной части объектов воздействия, которое включает следующие действия:

$^2D_{19}$ – имитация определения первичных характеристик;

$^2D_{20}$ – имитация измерения первичных характеристик;

$^2D_{21}$ – имитация передачи значений первичных характеристик, предназначенных для одного или нескольких других пунктов управления одной группы в качестве удаленно измеренных, на эти пункты управления;

$^2D_{22}$ – имитация приема удаленно измеренных на другом пункте управления значений первичных характеристик своих объектов воздействия;

$^2D_{23}$ – имитация вычисления вторичных характеристик;

$^2D_{24}$ – имитация селекции объектов по характеристикам;

$^2D_{25}$ – одновременно с имитациями доопределения на пунктах управления второго уровня данных о выделенной части объектов воздействия – имитация формирования команды на доопределение данных о своих ТС, средствах защиты и сложившейся обстановке;

$^2D_{26}$ – имитация передачи команды на доопределение данных по линиям связи на пункты управления первого уровня, входящие в состав одной группы;

$^1D_{27}$ – имитация формирования на пунктах управления первого уровня базы данных своего ТС, средствах защиты и сложившейся обстановке;

$^1D_{28}$ – имитация доопределения данных об объектах воздействия, которое включает следующие действия:

$^1D_{29}$ – имитация определения первичных данных;

$^1D_{30}$ – имитация измерения первичных данных;

¹D₃₁ – имитация передачи значений первичных характеристик, предназначенных для одного или нескольких других пунктов управления одной группы в качестве удаленно измеренных, на эти пункты управления;

¹D₃₂ – имитация приема удаленно измеренных на другом пункте управления значений первичных характеристик своих объектов воздействия;

¹D₃₃ – имитация вычисления вторичных данных;

¹D₃₄ – имитация селекции объектов по полученным данным;

¹D₃₅ – имитация передачи на ПУ второго уровня данных о своем ТС, средствах защиты и сложившейся обстановке;

²D₃₆ – имитация сбора на ПУ второго уровня доопределенных данных о состоянии ТС своей группы, средствах защиты и сложившейся обстановке;

²D₃₇ – имитация уточнения базы данных ТС своей группы, средствах защиты и сложившейся обстановке.

²D₃₈ – имитация идентификации средств защиты;

²D₃₉ – имитация классификации средств защиты;

²D₄₀ – имитация определения приоритетов объектов воздействия;

²D₄₁ – имитация формирования списка объектов воздействия в соответствии с полученными значениями их приоритетов;

²D₄₂ – имитация оценки эффективности осуществления воздействия на внесенные в список приоритетных объектов воздействия штатными ТС;

²D₄₃ – имитация формирования случайным образом списка ТС, значения эффективности которых оказались достаточными для осуществления воздействия на объекты из сформированного списка;

²D₄₄ – имитация распределения объектов для осуществления воздействия между ТС путем последовательного попарного соотнесения объектов воздействия и ТС из соответствующих сформированных списков;

²D₄₅ – имитация формирования целеуказания штатным ТС для осуществления воздействия на выбранные объекты;

²D₄₆ – имитация формирования команд управления в виде управляющих сигналов;

²D₄₇ – имитация передачи команд управления техническим средствам;

²D₄₈ – имитация канала связи.

Результаты экспериментов

Построение и эксплуатация систем защиты информации новых объектов защиты нуждается в исследовании для определения эффективных подходов на всех стадиях жизненного цикла [16]. Одним из важнейших направлений здесь является оценка эффективности управления защитой информации [15]. При этом основной целью управления будет являться своевременная выработка и реализация управляющего воздействия на управляемый объект. При решении поставленной задачи необходимо учесть, что подобные системы только начинают создавать-

ся, единых подходов нет – не только к обеспечению защиты информации, но и к построению самих систем и их компонентов [12]. Поэтому необходимо разработать инструменты для определения подходов к построению систем защиты, так и для определения показателей её эффективности [18].

При выборе показателя эффективности защиты информации будем исходить из того, что эффективность управления защитой информации оценивается с помощью показателя эффективности управления [13]. Показатель эффективности характеризует степень соответствия рассматриваемой системы своему назначению [14]. Исходя из основного целевого назначения системы управления – своевременной выработки и реализации правильного управляющего воздействия на управляемый объект, показателем эффективности управления защитой информации W_3 целесообразно выбрать вероятность своевременного принятия и реализации правильного решения, обеспечивающего оптимальное использование возможностей подчиненных технических средств.

Её можно представить в следующей форме:

$$W_3 = p[(I_{Pk} \geq I_P), (I_{Mk} \geq I_M), (\tau \leq \tau_{кр})], \quad (1)$$

где p – вероятность того, что вся необходимая для принятия решения информация будет собрана и правильное решение будет своевременно принято и реализовано; I_{Pk} – фактически собираемое и обрабатываемое количество информации об объектах воздействия; I_P – количество требуемой информации об объектах воздействия; I_{Mk} – фактически собираемое и обрабатываемое количество информации о компонентах системы защиты, привлекаемых для выполнения задач; I_M – количество требуемой информации о компонентах системы защиты, привлекаемых для выполнения задач; τ – время цикла управления; $\tau_{кр}$ – критическое (требуемое) время цикла управления.

Приведенное соотношение (1) количественно характеризует противоположные факторы, отражающие, с одной стороны, необходимость сбора и обработки больших объемов информации, а с другой – отводимое на это ограниченное время.

При решении задачи определения показателя эффективности управления защитой информации (далее – ЗИ) целевой составляющей будет являться количество информации об объектах воздействия I_{Pk} , которая фактически собирается и обрабатывается в процессе управления для решения стоящей задачи, и его соотношение с количеством требуемой информации об объектах воздействия I_P , а на время цикла управления τ накладывается ограничение. Значение ограничения выбирается близким к $\tau_{кр}$, исходя из опыта построения подобных систем управления, а также на основе анализа эффективности применения рассматриваемых средств.

Считается, что информация о компонентах системы защиты информации I_M , а также о критическом времени цикла управления $\tau_{кр}$ при выполнении стоящей задачи всегда известна в системе управления из результатов анализа конкретной задачи. По-

этому для оценки параметров процессов управления компонентами системы защиты информации необходимо определять количество требуемой для управления информации об объектах воздействия I_p .

Значение количества информации об объектах воздействия I_{pk} и информации о компонентах системы защиты, привлекаемых для выполнения задач I_{Mk} , привлекаемых для выполнения задачи, которая фактически собирается и обрабатывается в процессе управления для решения задач, а также реальное время цикла управления τ и соотношение этих величин с требуемыми значениями рассчитать аналитическим методом крайне затруднительно ввиду большой сложности исследуемых процессов управления (многомерность, большое количество параметров, стохастичность, параллельность протекания процессов), поэтому они определяются с помощью имитационного моделирования процессов управления. При этом в имитационной модели для оценивания показателя эффективности управления защитой информации будем использовать следующую мультипликативную форму:

$$W_{\Sigma} = P_{\text{св.сб}} \times P_{\text{пр}} \times P_{\text{св.пр}} \times P_p, \quad (2)$$

где $P_{\text{св.сб}}$ – вероятность своевременного сбора всей необходимой для принятия решений информации; $P_{\text{пр}}$ – вероятность правильного принятия решений; $P_{\text{св.пр}}$ – вероятность своевременного и правильного принятия решений; P_p – вероятность своевременной реализации принятых решений. Под своевременной реализацией принятых решений понимается своевременное доведение соответствующих команд до компонентов системы защиты информации.

Порядок оценки показателя эффективности при этом может быть следующим:

- вводятся исходные данные;
- вычисляется сумма величин весовых коэффициентов важности K_i базового аргумента, вычисляется весовой коэффициент K ;
- анализируется соответствие вариантов решений и ситуаций;
- учитывается коэффициент важности первого аргумента;
- вычисляется число совпадений вариантов решений и ситуаций;
- анализируются результаты оценки числа совпадений вариантов решений и ситуаций и по наибольшему числу совпадений выбирается лучшее решение;
- оценивается время, затраченное на принятие решения i -м лицом, принимающим решения (далее – ЛПР) в j -й ситуации;
- одновременно с оценкой времени, затраченного на принятие решения i -м ЛПР в j -й ситуации, оценивается время реализации решений t_{ij} ;
- одновременно с оценкой времени, затраченного на принятие решения i -м ЛПР в j -й ситуации, оценивается время t_{ij} , затраченное на сбор всей необходимой для принятия решения информации в j -й ситуации;
- определяется количество своевременно принятых для j -й ситуации решений R_j , одновременно

определяется количество своевременно реализованных решений;

- с определением количества своевременно принятых для j -й ситуации решений R_j одновременно определяется количество своевременно реализованных решений C_j ;
- одновременно с определением количества своевременно принятых для j -й ситуации решений R_j определяется количество ситуаций $M_{\text{св.инф.}j}$, для принятия решения в которых вся необходимая информация была собрана своевременно;
- определяются правильно принятые решения для j -й ситуации;
- определяется количество правильно принятых решений для j -й ситуации S_j ;
- определяется общее количество правильно принятых решений;
- определяется общее относительное количество правильно принятых решений;
- определяется относительное количество своевременно и правильно принятых решений;
- определяется общее относительное количество своевременно и правильно принятых решений;
- одновременно с определением общего относительного количества своевременно и правильно принятых решений определяется общее относительное количество своевременно реализованных решений;
- определяется вероятность правильного принятия решений $P_{\text{пр}}$:

$$P_{\text{пр}} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{S_{\text{пр.}j}}{L}, \quad (3)$$

где M – число рассматриваемых ситуаций; L – количество ЛПР, участвующих в работе для j -й ситуации; $S_{\text{пр.}j}$ – число правильно принятых решений j -й ситуации;

- одновременно с определением вероятности правильного принятия решений определяется вероятность своевременного сбора всей необходимой для принятия решений информации $P_{\text{св.сб}}$;
- определяется вероятность своевременного и правильного принятия решений $P_{\text{св.пр}}$:

$$P_{\text{св.пр}} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{R_j}{S_{\text{пр.}j}}, \quad (4)$$

где R_j – число своевременно и правильно принятых для j -й ситуации решений;

$$R_j = \sum_{i=1}^L R_{ij}, \quad (5)$$

где

$$\begin{cases} R_{ij} = 1, & \text{если } t_{ij} \leq t_{\text{доп}}, \\ R_{ij} = 0, & \text{если } t_{ij} > t_{\text{доп}}, \end{cases} \quad (6)$$

где t_{ij} – текущее значение времени, затраченного на принятие решения i -м ЛПР в j -й ситуации; $t_{\text{доп}}$ – допустимое время на принятие решения; – одновременно с определением вероятности правильного принятия решений и вероятности своевременного и правильного принятия решений определяется вероятность своевременной реализации принятых решений $P_{\text{св.р}}$:

$$P_{c,вр} = \frac{1}{Q \times M} \sum_{j=1}^M \frac{C_j}{R_j}, \quad (7)$$

где C_j – число своевременно реализованных правильно и своевременно принятых для j -й ситуации решений;

$$C_j = \sum_{q=1}^Q C_{qj}, q = \overline{1, Q}, \quad (8)$$

где Q – число направлений связи, соответствующее числу исполнителей;

$$\begin{cases} C_{qj} = 1, & \text{если } t_{qj} \leq t_{\text{доп.р}}, \\ C_{qj} = 0, & \text{если } t_{qj} > t_{\text{доп.р}}, \end{cases} \quad (9)$$

где t_{qj} – текущее значение времени, затраченное на реализацию правильно и своевременно принятых решений в j -й ситуации; $t_{\text{доп.р}}$ – допустимое время на реализацию принятого решения;

– определяется значение показателя эффективности управления защитой информации W_3 .

В результате работы появляется возможность определить показатель эффективности управления защитой информации, получить следующие результаты:

– статистические характеристики оцениваемых показателей (текущее, минимальное, максимальное, среднее значение);

– графики текущих и средних значений оцениваемых показателей;

– гистограммы и статистические функции распределения значений оцениваемых показателей, которые позволяют проводить оценку эффективности управления системой защиты информации таких компонентов, как:

– контроль и оперативное реагирование за событиями безопасности и действиями персонала;

– анализ и оценка функционирования системы защиты информации, включая выявление, анализ и устранение недостатков в ее функционировании;

– оперативное принятие мер по устранению инцидентов.

Результаты экспериментов

Предложенная модель и способ оценки эффективности позволят оценить предлагаемые технические решения по проектированию систем защиты информации объектов критической информационной инфраструктуры и выбрать оптимальные. В дальнейших исследованиях авторами предлагается апробировать предложенные алгоритмы на конкретных объектах.

Литература

1. Пат. 2326442 РФ, МПК: G 07 C 3 00, G 06 F 17 00. Способ оценки эффективности управления и устройство для его осуществления / В.А. Селифанов (РФ), В.В. Селифанов (РФ). – № 2007102742/09; заявл. 24.01.2007; опубл. 10.06.2008. – Бюл. № 16. – 19 с.

2. Пат. 2517409 РФ, МПК: G 07 C 3 00, G 06 F 17 00. Способ оценки эффективности управления и устройство для его осуществления / Г.Н. Акиншина (РФ), Ю.Н. Богданов (РФ), А.М. Леонтьев (РФ), Е.А. Решетняк (РФ), В.А. Селифанов (РФ). – № 2011106224/08; заявл. 17.02.2011; опубл. 27.05.2014. – Бюл. № 15. – 25 с.

3. Приказ ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. № 17 «Об утверждении требований по защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702>, свободный (дата обращения: 15.05.2018).

4. Приказ ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. № 21 «Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/691>, свободный (дата обращения: 15.05.2018).

5. Приказ ФСТЭК России от 14 марта 2014 г. № 31 «Об утверждении требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/868-prikaz-fstek-rossii-ot>, свободный (дата обращения: 15.05.2018).

6. Приказ ФСТЭК России от 21.12.2017 № 235 «Об утверждении требований к созданию систем безопасности значимых объектов КИИ РФ и обеспечению их функционирования» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1589-prikaz-fstek-rossii-ot-21-dekabrya-2017-g-n-236>, свободный (дата обращения: 15.05.2018).

7. Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239 «Об утверждении требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minjust.consultant.ru/documents/38914>, свободный (дата обращения: 15.05.2018).

8. Федеральный закон от 26.07.2017 № 187 «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/42128>, свободный (дата обращения: 15.05.2018).

9. Пат. 2451965 РФ, МПК: G 07 C 3 00, G 06 F 17 00. Способ трёхуровневого управления техническими средствами и система для его осуществления / В.А. Селифанов (РФ). – № 2011114534/08; заявл. 13.04.2011; опубл. 27.05.2012. Бюл. № 15. – 29 с.

10. Пат. 2451966 РФ, МПК: G 07 C 3 00, G 06 F 17 00. Способ адаптивного управления и система адаптивного управления для его осуществления / В.А. Селифанов (РФ). – № 2011118677/08; заявл. 10.05.2011; опубл. 27.05.2012. Бюл. № 15. – 31 с.

11. Голдобина А.С. Выбор имитационной модели процессов управления защитой информации для оценки эффективности государственных и муниципальных систем / А.С. Голдобина, Ю.А. Исаева // Инновационное развитие науки и образования: сб. статей междунар. науч.-практ. конф. (Пенза). – 2018. – Т. 2, № 2. – 86 с.

12. Селифанов В.В. Оценка эффективности системы защиты информации государственных информационных систем от несанкционированного доступа // Интеграция науки, общества, производства и промышленности: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск). – 2016. – 109 с.

13. Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. – Т. 1: Методология. Организация, терминология / В.С. Авдусевский, И.В. Аполонов, Е.Ю. Барзелович и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 223 с.

14. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200058320>, свободный (дата обращения: 15.05.2018).

15. Старикова А.А. Оценка эффективности управления системой защиты информации в государственных информационных системах / А.А. Старикова, Д.Г. Макарова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 8. – 188 с.

16. Исаев И.И. Анализ методов эффективности защиты информации // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем: сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. – 2017. – Воронеж: Воронеж. ин-т МВД России. – 235 с.

17. Даурцев А.В. Разработка математических моделей оценки показателей эффективности программных систем защиты информации в автоматизированных системах электронного документооборота // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 7, № 2. – С. 27–31.

18. Меньших В.В. Получение оценок эффективности системы защиты информации с использованием автоматной модели имитации функционирования защищенной информационной системы / В.В. Меньших, Е.В. Петрова // Информация и безопасность. – 2011. – Т. 14, № 1. – 125 с.

19. Анисимов В.Г. Методика оценки эффективности защиты информации в системе межведомственного информационного взаимодействия при управлении обороной государства / В.Г. Анисимов, А.А. Селиванов, Е.Г. Анисимов // Информация и космос. – 2016. – № 4. – С. 76–80.

20. Звягинцева П.А. Оценка эффективности средств защиты информации / П.А. Звягинцева, О.А. Крыжановская // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 8. – С. 199.

21. Беляева О.В. Имитационное моделирование систем защиты / О.В. Беляева, В.А. Грицык // Междунар. журнал экспериментального образования. – 2010. – Вып. 5. – С. 67.

22. Цветкова О.Л. Имитационное моделирование зависимости информационной безопасности организации от области деятельности / О.Л. Цветкова, С.А. Заслонов // Вестник Донского гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 18, № 4 (91). – 116 с.

Голдобина Анастасия Сергеевна

Магистрант Сибирского гос. ун-та геосистем и технологий, инженер-аналитик
ООО «Акстел-безопасность»
Колхидская ул., д. 9, г. Новосибирск, Россия, 630096
Тел.: +7-923-220-80-89
Эл. почта: nastya-gold09@mail.ru

Исаева Юлия Алексеевна

Магистрант Сибирского гос. ун-та геосистем и технологий, специалист по информационной безопасности,
ООО «Первый строительный фонд»
Гоголя ул., д. 188, г. Новосибирск, Россия, 630112
Тел.: +7-913-980-23-09
Эл. почта: isaeva.ja@hotmail.com

Селифанов Валентин Валерьевич

Доцент каф. информационной безопасности
Сибирского гос. ун-та геосистем и технологий
Ельцовская ул., д. 2/3, г. Новосибирск, Россия, 630001
Тел.: +7-913-905-64-02
Эл. почта: sf01@mail.ru

Климова Александра Михайловна

Магистрант Новосибирского гос. технического ун-та,
Немировича-Данченко ул., д. 136, г. Новосибирск,
Россия, 630073
Тел.: +7-999-466-39-66
Эл. почта: aleksandra.kl.15.6@gmail.ru

Зенкин Павел Сергеевич

Аспирант Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр., д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-906-995-61-15
Эл. почта: zenkin.pavel.88@mail.ru

Goldobina A.S., Isaeva Yu.A., Selifanov V.V.,
Klimova A.M., Zenkin P.S.

Building an adaptive three-tier model of management processes for the information security system of critical information infrastructure objects

The article discusses a three-tier model of information security management processes based on the example of objects of critical information infrastructure. Critical information infrastructures of the Russian Federation, in order to avoid the implementation of various security incidents, require constant analysis and updating of work rules. The authors proposed an algorithm that allows making timely development of solutions by simulating the processes of the systems. System modeling allows to assess the effectiveness of the system and make the necessary proposals to improve the level of security.

Keywords: three-level model, control system, performance evaluation, information protection system.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-51-58

References

1. Pat. 2326442 RF, IPC: G 07 C 3 00, G 06 F 17 00. *A method for evaluating the effectiveness of control and a device for its implementation* / V.A. Selifanov (RF), V.V. Selifanov (RF). – No. 2007102742/09; declare 01/24/2007; publ. 10.06.2008, Bull. № 16, 19 p. (in Russ.).

2. Pat. 2517409 RF, IPC: G 07 C 3 00, G 06 F 17 00. *A method for evaluating the effectiveness of control and a device for its implementation* / G.N. Akinshina (RF), Yu.N. God Dan (RF), A.M. Leontyev (RF), E.A. Reshetnyak (RF), V.A. Selifanov (RF). – No. 2011106224/08; declare February 17, 2011; publ. 05/27/2014, Bull. № 15, 25 p. (in Russ.).

3. Order of the FSTEC of Russia of February 11, 2013 No. 17 «On approval of requirements for the protection of information that is not a state secret contained in state information systems». – Access mode: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702>, free (accessed: May 15, 2018) (in Russ.).

4. Order of the FSTEC of Russia dated February 18, 2013 No. 21 «On Approval of the Composition and Content of Organizational and Technical Measures to Ensure the Security of Personal Data when Processing the Information Systems of Personal Data». – Access mode: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/691>, free (accessed: May 15, 2018) (in Russ.).

5. Order of the FSTEC of Russia dated March 14, 2014 No. 31 «On approval of Requirements for ensuring the protection of information in automated systems for managing production and technological processes at critical facilities, potentially dangerous objects, as well as facilities that pose an increased risk to life and health of people and for the environment». – Access mode: <https://fstec.ru/normotvor>

- cheskaya/akty/53-prikazy/868-prikaz-fstek-rossii-ot, free (accessed: May 15, 2018) (in Russ.).
6. Order of the FSTEC of Russia of December 21, 2017 No. 235 «On approval of Requirements for the creation of security systems for significant facilities of the Russian Federal Institute of Exercises and ensuring their functioning». – Access mode: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1589-prikaz-fstek-rossii-ot-21-dekabrya-2017-g-n-236>, free (accessed: May 15, 2018) (in Russ.).
7. Order of the FSTEC of Russia of December 25, 2017 No. 239 “On Approval of Requirements for Ensuring the Security of Important Objects of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation”. – Access mode: <https://minjust.consultant.ru/documents/38914>, free (accessed: May 15, 2018) (In Russ.).
8. Federal Law of 26.07.2017 No. 187 «On the Security of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation». – Access mode: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/42128>, free (accessed: May 15, 2018) (in Russ.).
9. Pat. 2451965 RF, IPC: G 07 C 3 00, G 06 F 17 00. A method of three-level control of technical equipment and a system for its implementation, V.A. Selifanov (RF). No. 2011114534/08; declare 04/13/2011; publ. 27.05.2012, Bull. № 15, 29 p. (in Russ.).
10. Pat. 2451966 RF, IPC: G 07 C 3 00, G 06 F 17 00. Adaptive control method and adaptive control system for its implementation / V.A. Selifanov (RF). No. 2011118677/08; declare 05/10/2011; publ. 27.05.2012, Bull. № 15, 31 p. (in Russ.).
11. Goldobina A.S., Isaeva Yu.A. Choosing a simulation model of information security management processes for assessing the effectiveness of state and municipal systems. *Innovative development of science and education. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference (Penza)*, 2018, vol. 2, no. 2, 86 p. (in Russ.).
12. Selifanov V.V. Assessment of the effectiveness of the information security system of state information systems from unauthorized access. *Integration of science, society, industry and industry. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference (Novosibirsk)*, 2016, 109 p. (in Russ.).
13. Reliability and efficiency in technology: Reference book in 10 tons. No. 1. Methodology. The organization of terminology and logic. Moscow: Mashinostroy-Publishing House, 1986, 26 p. (in Russ.).
14. GOST R 50922-2006. Protection of information. Basic terms and definitions. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200058320>, free (accessed: May 15, 2018) (in Russ.).
15. Starikova A.A., Makarova D.G. Evaluation of the effectiveness of managing the information security system in state information systems. *Interexpo Geo-Siberia*, 2017, vol. 8, 188 p. (in Russ.).
16. Isaev I.I. Analysis of methods for the effectiveness of information protection. *Actual issues of operating security systems and protected telecommunication systems: Coll. materials of the All-Russian scientific-practical conference*, 2017, Voronezh: Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 235 p. (in Russ.).
17. Daurtsev A.V. Development of mathematical models for assessing the performance of software information protection systems in automated electronic document management systems. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2011, vol. 7, no. 2, p. 27–31 (in Russ.).
18. Smaller V.V., Lesser V.V., Petrova E.V. Obtaining estimates of the effectiveness of the information security system using an automaton model for simulating the functioning of a protected information system. *Information and security*, 2011, vol. 14, no. 1, 125 p. (in Russ.).
19. Anisimov V.G., Selivanov A.A., Anisimov E.G. Methods of assessing the effectiveness of information protection in the system of interdepartmental information interaction in the management of state defense. *Information and space*, 2016, № 4, 76 p. (in Russ.).
20. Zvyagintseva P.A., Kryzhanovskaya O.A. Evaluation of the effectiveness of information security. *Interexpo Geo-Siberia*, 2017, vol. 8, 199 p. (in Russ.).
21. Belyaeva O.V., Grytsyk V.A. Simulation modeling of protection systems. *International Journal of Experimental Education*, 2010, vol. 5, 67 p. (in Russ.).
22. Tsvetkova O.L., Barriers S.A. Simulation modeling of the information security of an organization as a function of its field of activity. *Bulletin of the Don State Technical University*, 2017, vol. 18, no. 4 (91), 116 p. (in Russ.).

Anastasiya S. Goldobina

Master Student, Siberian state University of Geosystems and Technologies, Analyst Engineer LLC «Axxtel-security» 9, Kolkhidskaya st., Novosibirsk, Russian Federation, 630096
Phone: +7-923-220-80-89
Email: nastya-gold09@mail.ru

Julia A. Isaeva

Master Student, Siberian state University of Geosystems and Technologies, LLC «The First Building Fund» 188, Gogoly st., Novosibirsk, Russian Federation, 630112
Phone: +7-913-980-23-09
Email: isaeva.ja@hotmail.com

Valentin V. Selifanov

Federal Service for Technical and Export Control, 2/3, El'tsovskaya st., Novosibirsk, Russian Federation, 630001
Phone: +7-913-905-64-02
Email: sfo1@mail.ru

Aleksandra M. Klimova

Master Student, Department of Computer Science, Novosibirsk State Technical University 136, Nemirovicha-Danchenko st., Novosibirsk, Russian Federation, 630073
Phone: +7-999-466-39-66
Email: aleksandra.kl.15.6@gmail.ru

Pavel S. Zenkin

Postgraduate Student of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin av., Tomsk, Russian Federation, 634050
Phone: +7-906-995-61-15
Email: zenkin.pavel.88@mail.ru

УДК 004.315

А.А. Кожевников

Мультифункциональные арифметические устройства в остаточных классах

Приводится анализ некоторых подходов к формированию простейших вычислительных структур, позволяющих выполнить несколько арифметических операций в системе остаточных классов. Акцент на реализацию алгоритмов цифровой обработки сигналов после соответствующего преобразования в модулярный код инициирует переход к функционированию устройств на основе дискретных фаз гармоник большой частоты.

Ключевые слова: система остаточных классов, арифметические устройства.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-59-62

Повышение быстродействия цифровой обработки сигнала (ЦОС) возможно за счет внедрения вычислительных средств на основе системы остаточных классов [1–3] (СОК). В ряде случаев такой подход также позволяет снизить информационную избыточность в узлах спецпроцессоров [4]. Дальнейшее развитие данной идеи ведет к поиску других положительных эффектов при формировании соответствующих вычислительных структур. Базовая арифметика ЦОС в СОК строится на сложении (вычитании) и умножении, и может выполняться в параллельных трактах без обращения значений вычетов друг к другу [5]. Малость величины остатков позволяет реализовать унифицированные устройства с выигрышем в аппаратуре и быстродействии по сравнению с монофункциональными. Целью работы является анализ основных подходов к формированию структур, позволяющих выполнять несколько различных арифметических операций.

Цифровые устройства

Ряд алгоритмов, лежащих в основе логики синтеза многофункциональных устройств, использует известное выражение для вычисления произведения двух операндов, которое получается из квадратов суммы и разности:

$$a \cdot b = \frac{1}{4}[(a+b)^2 - (a-b)^2]. \quad (1)$$

Рассмотрим структуру, представленную в работе [6] (рис. 1, а). Здесь Д1 и Д2 – дешифраторы; Т1–Т4 – табличные вычислители; УК – умножение на константу, Ш – шифратор. Для выполнения модульного действия соотношение (1) принимает вид

$$(\gamma_a \cdot \gamma_b) \bmod m =$$

$$= \left[\frac{1}{4}(\gamma_a + \gamma_b)^2 \bmod m - \frac{1}{4}(\gamma_a - \gamma_b)^2 \bmod m \right] \bmod m,$$

где m – модуль операции, γ_a, γ_b – операнды-вычеты.

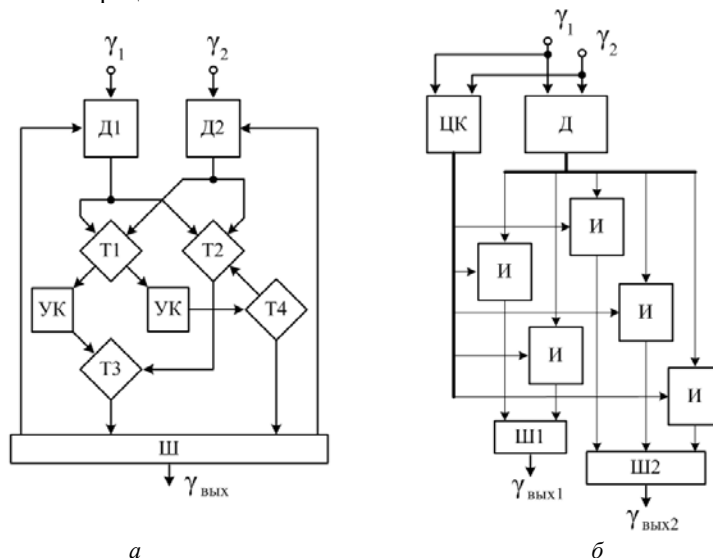


Рис. 1. Обобщенные схемы арифметических устройств: а – [6], б – [7, 8]

С целью уменьшения аппаратных затрат в работе предлагается использовать внутренний модуль $k \approx \sqrt{m}$, при этом сумма и разность входящих остатков представляется в виде

$$\begin{aligned} (\gamma_a + \gamma_b) \bmod m &= [k \cdot (\gamma'_a + \gamma'_b) + (\gamma''_a + \gamma''_b)] \bmod m, \\ (\gamma_a - \gamma_b) \bmod m &= [k \cdot (\gamma'_a - \gamma'_b) + (\gamma''_a - \gamma''_b)] \bmod m, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\gamma'_a = [\gamma_a / k]$, $\gamma'_b = [\gamma_b / k]$, $\gamma''_a = \gamma_a \bmod k$, $\gamma''_b = \gamma_b \bmod k$.

Для выполнения операции сложения (вычитания) дешифраторы Д1 и Д2 преобразуют входные величины к виду γ' и γ'' , которые поступают на Т1 и Т2 соответственно. Далее через блоки УК, Т3 и Т4 идет выполнение (2) с восстановлением размерно-

сти итогового вычета. Реализация операции умножения по модулю включает в себя предыдущие шаги, где дополнительно в Ш подключаются схемы квадраторов, возвращающих полученные значения обратно в Д1 и Д2, после чего осуществляется тот же алгоритм с дополнительным делением итогового значения на четыре. Последнее действие производится умножением на Y – обратную мультипликативную величину числа 4, которая определяется из уравнения $|Y \cdot 4|_m = 1$. Например, для $m = 61$ имеем $|Y \cdot 4|_{61} = 1$, откуда $Y = 46$.

Другой подход к реализации многофункциональных устройств основан на идее объединения в единой конструкции операций умножения и возведения в произвольную степень. Для этого авторы [7, 8] опираются на возможности бинарных манипуляций с унитарным кодом остатков в СОК. Основной фокус представленного в публикациях способа смещен на логику вычислений степенной зависимости, поскольку ее табличная реализация имеет особенности в симметрии по сравнению с умножением. Здесь (см. рис. 1, б) входные операнды попадают на дешифратор (Д) и цифровой компаратор (ЦК), по результатам работы которых активируются определенные табличные элементы на основе групп конъюнкции (И), и через шифраторы (Ш1 и Ш2) формируются итоговые вычеты $\gamma_{\text{вых1}}$ и $\gamma_{\text{вых2}}$, соответствующие заданным функциям.

Тональные устройства

Известные АЦП в СОК показали свою слабость по сравнению с привычными позиционными устройствами, что выражается как через пониженное быстродействие [9, 10], так и точность преобразования [11]. Требуется другая парадигма, основанная на представлении вычетов в виде дискретных фаз тональных сигналов большой частоты. Соответственно и алгоритмы ЦОС должны быть перенесены на вычислительные структуры, отвечающие предложенному формату [12, 13]. Прямой подход к решению задачи многофункциональности арифметических устройств заложен в табличном построении [14]. Здесь в качестве элементов памяти выступают управляемые фазовращатели, а доступ к конкретной ячейке осуществляется адресацией через фазированные ключи [15].

Реализация конструкции на основе как алгоритма умножения двух операндов (1), так и табличного способа вычислений определяет не только многофункциональность устройства, но и повышенное быстродействие.

Перепишем (1):

$$4ab = (a+b)^2 - (a-b)^2. \quad (3)$$

С учетом дискретно-фазированного представления по модулю m (3) предстанет в виде

$$\begin{aligned} & \frac{2\pi}{m} \cdot (4\gamma_a \gamma_b) \bmod m = \\ & = \frac{2\pi}{m} (\gamma_a + \gamma_b)^2 \bmod m - \frac{2\pi}{m} (\gamma_a - \gamma_b)^2 \bmod m, \quad (4) \end{aligned}$$

где γ_a и γ_b – вычеты чисел a и b по модулю m . В правой части для суммы и разности входных операндов произведем замену так, что

$$\begin{cases} (\gamma_a + \gamma_b) \bmod m = (2\gamma_{c1}) \bmod m, \\ (\gamma_a - \gamma_b) \bmod m = (2\gamma_{c2}) \bmod m, \end{cases} \quad (5)$$

тогда (4) примет вид

$$\begin{aligned} & \frac{2\pi}{m} \cdot (\gamma_a \gamma_b) \bmod m = \\ & = \frac{2\pi}{m} (\gamma_{c1})^2 \bmod m - \frac{2\pi}{m} (\gamma_{c2})^2 \bmod m. \quad (6) \end{aligned}$$

Если использовать результаты сложения и вычитания исходных операндов в качестве адресов для выбора набегов по фазе из заданных для функции умножения и равных $\frac{2\pi}{m} (\gamma_c)^2 \bmod m$, $\gamma_c \in [0; m-1]$, то останется только последнее вычитание фаз для окончательного выполнения алгоритма.

Рассмотрим пример. На соответствующие входы устройства подаются гармоники одной частоты (рис. 2):

- синхронизирующий $S_0 = \sin(\omega t)$,
- первый операнд $S_1 = \sin(\omega t + 2\pi \cdot \gamma_a / m)$,
- второй операнд $S_2 = \sin(\omega t + 2\pi \cdot \gamma_b / m)$,

где γ_a и γ_b – вычеты по модулю m , над которыми осуществляется необходимая операция. В качестве иллюстрации работы устройства рассмотрим три функции: вычитание, умножение и сумму квадратов двух операторов по модулю m .

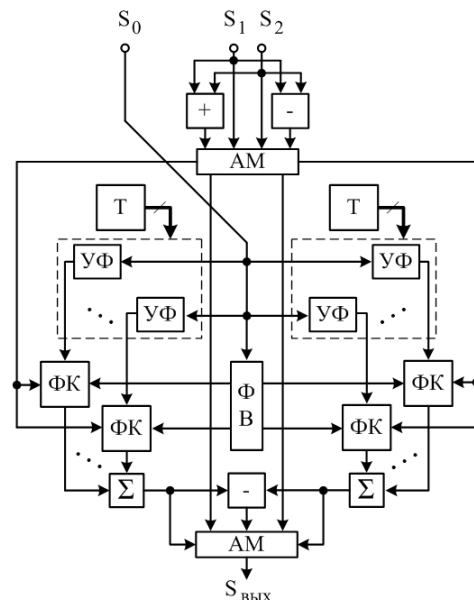


Рис. 2. Тональное арифметическое устройство

1. Вычитание.

Выход первого блока разности фаз «←» через аналоговые мультиплексоры (АМ) коммутируется непосредственно к выходу. Простейшие операции с дискретными фазами рассмотрены в [12]. После работы соответствующего блока разности на выходе наблюдается сигнал

$$S_{\text{вых}} = \sin[\omega t + 2\pi \cdot (\gamma_a - \gamma_b) / m].$$

2. Умножение

Сумматор фаз «+» и первый блок разности фаз «-» через первый АМ коммутируются на входы фазированных ключей (ФК) соответственно первой и второй группы. Управляемые фазовращатели (УФ) настраиваются в соответствии с таблицами в ПЗУ (Т) для операции умножения на набег фазы $\frac{2\pi}{m}(\gamma_c)^2 \bmod m$, где $\gamma_c \in [0; m-1]$. Второй АМ подключает выход устройства к второму блоку разности фаз.

Блоки «+» и «-» формируют сумму и разности фаз гармоник входных операндов:

$$S_+ = \sin[\omega t + 2\pi \cdot (\gamma_a + \gamma_b) / m],$$

$$S_- = \sin[\omega t + 2\pi \cdot (\gamma_a - \gamma_b) / m],$$

которые используются в качестве адреса, позволяющих пропустить сигналы от соответствующих УФ. На втором блоке разности фаз происходит окончательная реализация алгоритма, соответствующего выражению (4):

$$S_{\text{вых}} = \sin\left[\omega t + \frac{2\pi}{m} \cdot (\gamma_a \cdot \gamma_b) \bmod m\right].$$

Если рассмотреть данные вычисления на цифрах для $\gamma_a = 2$, $\gamma_b = 3$ и $m = 5$, то получим следующие соотношения:

$$S_+ = \sin[\omega t + 2\pi \cdot (5) / 5] = \sin(\omega t),$$

$$S_- = \sin[\omega t + 2\pi \cdot (-1) / 5] = \sin[\omega t + 2\pi \cdot 4 / 5].$$

Эти сигналы задают адреса для УФ, настроенных на $0 \cdot 2\pi/5 = 0$ и $4 \cdot 2\pi/5 = 8\pi/5$. На выходе формируется:

$$S_{\text{вых}} = \sin\left[\omega t + 0 - 4 \cdot \frac{2\pi}{5}\right] = \sin\left[\omega t + 1 \cdot \frac{2\pi}{5}\right] =$$

$$= \sin\left[\omega t + \frac{2\pi}{5} \cdot (2 \cdot 3) \bmod 5\right].$$

3. Сумма квадратов

Входы операторов S_1 и S_2 через первый АМ коммутируются на ФК соответственно первой и второй группы. Управляемые фазовращатели настраиваются в соответствии с функцией на квадрат и минус квадрат операнда по модулю. Второй АМ подключает выход устройства ко второму блоку разности фаз.

Рассмотрим работу устройства для $\gamma_a = 2$, $\gamma_b = 3$ и $m = 5$. Сигналы входных операндов используются в качестве адреса и позволяют пропустить гармоники от управляемых фазовращателей с фазами $4 \cdot 2\pi/5$ и $1 \cdot 2\pi/5$ соответственно. На втором блоке разности фаз происходит вычитание минус квадрата второго операнда из квадрата первого, формируя конечный результат:

$$S_{\text{вых}} = \sin\left[\omega t + \frac{2\pi}{5} \cdot 4 - \frac{2\pi}{5} \cdot 1\right] =$$

$$= \sin\left[\omega t + \frac{2\pi}{5} \cdot 3\right] = \sin\left[\omega t + \frac{2\pi}{5} \cdot (2^2 + 3^2) \bmod 5\right].$$

Заключение

Как видно из представленных примеров многофункциональных устройств, наиболее удобными подходами здесь являются табличный и гибридный,

последний из которых включает в себя предыдущий вариант, логично встроенный в конструкцию на основе алгоритма (1). Эти две основные парадигмы обоснованно занимают свое место как в цифровом формате кодов СОК, так и дискретно-фазированном. Представленные способы опираются на простоту табличной реализации и нюансы симметрии в расположении итоговых вычетов относительно входных операндов. Построение структур на основе выражения (1) позволяет повысить эффективность мультифункциональных устройств.

Литература

- Ирхин В.П. Табличная реализация цифровых фильтров в модулярной арифметике / В.П. Ирхин, Л.А. Овчаренко // Информационные технологии. – 2005. – №10. – С. 13–20.
- Галанина Н.А. Анализ эффективности синтеза устройств вычислительной техники для непозиционной цифровой обработки сигналов / Н.А. Галанина, Н.Н. Иванова // Кибернетика и программирование. – 2015. – № 3. – С. 1–6.
- Овчаренко Л.А. Реализация цифрового трансверсального фильтра в системе остаточных классов / Л.А. Овчаренко // Радиоэлектроника. – 2002. – №4. – С. 50–57.
- Мельник В.А. Информационная избыточность в узлах непозиционного спецвычислителя для телекоммуникационных устройств / В.А. Мельник, Р.В. Кузьменко, В.П. Ирхин // Вестник Воронеж. ин-та МВД России. – 2015. – №2. – С. 149–155.
- Акушский И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий. – М.: Сов. радио, 1968. – 440 с.
- Пат. 2157560 РФ, МПК G06F7/72, G06F7/49. Арифметическое устройство по модулю / В.П. Ирхин и др. – Оpubл. 10.10.2000.
- Ирхин В.П. Расширение функциональных возможностей вычислителей в телекоммуникационных устройствах / В.П. Ирхин, В.А. Мельник, Д.С. Шведов // Вестник Воронеж. ин-та ФСИН России. – 2016. – №1. – С. 21–26.
- Пат. 2624587 РФ, МПК G06F7/49. Устройство для умножения чисел по модулю / В.П. Ирхин и др. – Оpubл. 04.07.2017.
- Кожевников А.А. Методы непозиционного аналого-цифрового преобразования / А.А. Кожевников, К.П. Беспалов // Автотметрия. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 125–130.
- Кожевников А.А. Синтез аналого-цифровых, первичных и вторичных модулярных измерительных преобразователей // Наука. Инновации. Технологии. – 2017. – № 1. – С. 17–28.
- Кожевников А.А. Математическое обследование конвейерных АЦП в системе остаточных классов // Вестник БГТУ. – 2017. – № 7. – С. 27–34.
- Кожевников А.А. Арифметические вентили модулярных спецпроцессоров // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2018. – №2. – С. 46–51.
- Методы построения устройств аналоговых и полупаналоговых вычислителей / А.А. Кожевников, Д.С. Шведов // Сб. матер. междунар. науч.-практ. межведом. конф. «Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы». – Воронеж, 2016. – С. 258–260.
- Пат. 2656992 РФ, МПК G06F 7/72. Арифметическое устройство по модулю m / А.А. Кожевников и др. – Оpubл. 07.05.2018.

15. Пат. 2659866 РФ, МПК G01R 25/00, G01R 29/02, Н03К 17/00. Фазированный ключ по модулю m / А.А. Кожевников и др. – Оpubл. 04.07.2018.

Кожевников Алексей Александрович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. социально-гуманитарных, естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), г. Воронеж Урицкого ул., д. 75а, г. Воронеж, РФ, 394026
Тел.: +7-909-211-06-74
Эл. почта: akozhev@yandex.ru

Kozhevnikov A.A.

Multifunctional arithmetic devices in residual classes

The paper presents an analysis of some approaches to the formation of simple computational structures that allow performing several arithmetic operations in the residue number system. The emphasis is on the implementation of digital signal processing algorithms after the corresponding conversion to modular code, initializes the transition to the operation of devices based on discrete phases of high frequency harmonics.

Keywords: residue number system, arithmetic units.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-59-62

References

1. Irkhin V.P., Ovcharenko L.A. Table representation of digital filters in modular arithmetic. *Information Technology*, 2005, no.10, pp. 13–20 (in Russ.).
2. Galanina N.A., Ivanova N.N. Analysis of the effectiveness of synthesis of computing devices for non-positional digital signal processing. *Cybernetics and programming*, 2015, no. 3, pp. 1–6 (in Russ.).
3. Ovcharenko L.A. Implementation of a digital transversal filter in the system of residual classes. *Radio electronics*, 2002, no. 4, pp. 50–57 (in Russ.).
4. Melnik V.A., Kuzmenko R.V., Irkhin V.P. Information redundancy in the nodes of the nonpositional specialty calculator for telecommunication devices. *The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2015, no. 2, pp. 149–155 (in Russ.).

5. Akushskii I.Ya., Yuditskii D.I. *Mashinnaya arifmetika v ostatochnih klassah* [Arithmetic of computers in the residue number system]. Moscow, Sov. Radio, 1968, 440 p.

6. Patent RF no. 2157560. Arithmetic device by module / Irkhin V.P. et al., Published October 10, 2000 (in Russ.).

7. Irkhin V. P., Melnik V.A., Shvedov D.S. The expansion functionality of calculators in telecommunication devices. *Proceedings of Voronezh institute of the Russian federal penitentiary service*, 2016, no.1, pp. 21–26 (in Russ.).

8. Patent RF no.2624587. Device for multiplying by module / Irkhin V.P. et al. Published July 4, 2017. (In Russ.).

9. Kozhevnikov A.A., Bespalov K.P. Nonpositional analog-digital conversion methods. *Avtometriya*, 2015, no. 6, pp. 125–130 (in Russ.).

10. Kozhevnikov A.A. The synthesis of analog-to-digital, primary and secondary modular converters. *Science. Innovations. Technologies*, 2017, no. 1, pp. 17–28. (in Russ.).

11. Kozhevnikov A.A. Mathematical investigation of conveyer analog-digital conversions in the system of residual classes. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2017, no. 7, pp. 27–34/

12. Kozhevnikov A.A. Arithmetic simple devices of modular special processors. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 2, pp. 46–51 (in Russ.).

13. Kozhevnikov A.A., Shvedov D.S. Metody postroeniya ustrojstv analogovyh i poluanalogovyh vychisliteley [Methods for building devices of analog and semi-analog computers]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy mezhvedomstvennoy konferentsii Tekhnika i bezopasnost' ob"ektov ugovolno-ispolnitel'noj sistemy* [Materials of the International Scientific and Practical Interdepartmental Conference *Technique and safety of objects of the penitentiary system*]. Voronezh, 2016, pp. 258–260.

14. Patent RF no.2656992. Arithmetic device by m module / Kozhevnikov A.A. et al. Published May 7, 2018 (in Russ.).

15. Patent RF no.2659866. Phased key modulo m / Kozhevnikov A.A. et al. Published July 4, 2018 (in Russ.).

Alexey A. Kozhevnikov

Associate professor of the Department Social, Human, Natural Sciences and General Professional Disciplines, Rostov State Transport University, Voronezh city 75a, Uritskogo st., Voronezh, Russia, 394026
Phone: +7-909-211-06-74
Email: akozhev@yandex.ru

УДК 004.62

С.В. Разумников

Некомпенсаторное агрегирование и рейтингование провайдеров облачных услуг

По мере расширения тенденции к переносу приложений и задач в облака производители придают все большее значение партнерским отношениям с провайдерами облачных сервисов. При выборе поставщика облачных услуг заказчики часто сравнивают различные параметры площадок, на базе которых разворачивается облако. В статье предлагается модель выбора провайдеров облачных услуг на основе применения метода порогового агрегирования, который используется в задачах многокритериального оценивания. Основной характеристикой предложенного метода является его некомпенсаторный характер. Он заключается в невозможности компенсировать низкое значение используемого критерия высокими значениями других критериев. На основе предложенной модели строится рейтинг, отражающий сравнительную значимость различных провайдеров облачных услуг для предприятия.

Ключевые слова: облачные технологии, модель, провайдер, сервис, выбор, некомпенсаторность, рейтинг, метод порогового агрегирования.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-63-69

В ситуации перехода к цифровой экономике облако уже стало базовым требованием к трансформирующейся инфраструктуре. Главный фактор успеха в цифровых бизнес-моделях – быстрая реакция на изменения, и именно облачные ресурсы обеспечивают здесь бизнесу необходимый уровень гибкости и масштабирования. Спрос на облачные сервисы в России продолжает расти более чем на 25% в год, а в сегменте IaaS – более чем на 35–40%, по оценкам TAdviser [1]. В условиях сохраняющегося профицита мощностей конкуренция на рынке коммерческих дата-центров выстраивается за счет высоких показателей отказоустойчивости, безопасности и управляемости.

При принятии решения о внедрении облачных технологий на предприятии после выбора облачного сервиса необходимо разобраться, услугами какого провайдера лучше пользоваться. Для выбора такого поставщика важно его оценить, учитывая определенные параметры. При проведении оценки изучаются документы, соглашения, договоры. В анализе должны принимать участие коллектив предприятия и эксперты, которые будут представлять собой команду облачной стратегии [2–4].

Часто на практике мнение участников коллектива и экспертов выражается при помощи различных шкал оценок, которые проставляются каждым участником этого коллектива, например: «отлично», «средне», «плохо», «1, 2, 3, 4, 5» и т.д. Задача некомпенсаторного агрегирования заключается в том, чтобы корректно представить коллективное мнение из полученных наборов индивидуальных оценок. Усреднение наборов оценок не всегда возможно использовать, так как это может привести к неадекватному результату, т.е. когда низкие оценки одного эксперта могут быть компенсированы хорошими или средними оценками других экспертов [5]. В случае такого важного выбора, как провайдер облачных услуг, такое компенсирование невозможно. Поэтому оценка провайдеров облачных услуг без учета компенсаций является современной актуальной задачей.

Целью работы является разработка модели выбора провайдера облачных услуг некомпенсаторным методом порогового агрегирования. Использование данного метода не позволит компенсировать низкие оценки участников коллектива никакими самыми высокими оценками по другим критериям. Этот метод хорошо описан в работах [5–8] для разных градационных предпочтений.

Критерии отбора провайдеров облачных услуг

После выбора необходимого облачного сервиса необходимо разобраться, услугами какого провайдера лучше пользоваться. Существуют десятки компаний, которые оказывают данные услуги. В [9] описано, по каким критериям необходимо сравнивать облачных сервис-провайдеров, а также на что в первую очередь необходимо обратить внимание. На основе значений этих критериев можно построить рейтинг, отражающий сравнительную значимость различных провайдеров. Также для самих поставщиков и пользователей одной из основных проблем с современными облачными центрами обработки данных является их огромное потребление энергии, что делает управление потреблением энергии одной из самых горячих тем исследований в области облачных вычислений [10]. Данный вопрос касается больше эффективности их применения.

Рассмотрим критерии, которые необходимо учитывать при выборе провайдера облачных услуг.

Используемое оборудование

Надежность облачной платформы зависит во многом от того, какое будет использоваться оборудование для ее построения. При проведении проверки надежности оборудования провайдера следует обратить внимание на такие моменты:

1. *Оборудование должно быть современным.* Если провайдер будет использовать старое оборудование, то это будет сказываться на надежности и производительности облачного сервиса.

2. *Класс оборудования.* У каждого производителя оборудования имеются различные линейки, которые рассчитаны на решение разных задач – от

корпоративных промышленных решений, до низкобюджетных и средних решений, а также до моделей бытового уровня. Поэтому чем выше будет класс оборудования, тем производительнее и функциональнее будет облачная платформа провайдера облачных услуг.

3. *Оборудование ведущих в отрасли производителей.* Использование облачным провайдером серверов из низкобюджетного сегмента (например, Supermicro) повышает вероятность выхода из строя таких серверов, а это может привести к их перезапуску.

4. *Резервирование, дублирование и отсутствие единой точки отказа.* Используемое оборудование необходимо задублировать по направлениям:

- серверы должны обеспечивать необходимый запас мощности на тот случай, если будут скачки потребления вычислительных ресурсов;
- серверы необходимо обеспечить задублированными блоками охлаждения и питания;
- системе хранения данных необходимо быть задублированной либо должно быть два независимых контроллера;
- если из строя выйдет любой один элемент оборудования, это не должно повлиять на работоспособность комплекса в целом;
- сетевое оборудование должно дублироваться.

Производительность дисковой подсистемы

Базовый набор облачных ресурсов включает в себя вычислительные ресурсы процессора, исчисляемые в ГГц, оперативную память в ГБ и дисковое пространство в ГБ. К выбору необходимых параметров вычислительных ресурсов следует подходить особенно тщательно, так как на эффективную работу приложения влияет не столько объем выданного дискового пространства, сколько производительность дисковой подсистемы.

Выдача провайдером облачных услуг клиенту дисков какого-либо типа не будет гарантировать, что производительность будет соответствовать ожиданиям, поскольку она зависит и от нагрузки, которая создается другими потребителями облака.

Единственным реальным средством оценки дискового пространства и его производительности будут являться IOPs и Latency. IOPs – это количество выполненных операций при чтении-записи в секунду. Latency – это уровень задержек, возникающих при обращении к дискам.

В данных условиях важно, чтобы сервис-провайдер давал возможность управления IOPs-ами и раскрывал информацию об используемых дисковых массивах своей инфраструктурой.

Если облачный провайдер гарантирует показатели производительности (IOPs и latency), тогда клиенту нет необходимости разбираться, какие типы дисков использует провайдер [11].

Надежность площадки

Важным уровнем, который определяет доступность облачных услуг, является площадка, на которой будет размещена облачная платформа. Определяющий момент, который будет говорить о доступности площадки, – это то, что облачный провайдер

готов проводить демонстрацию своей площадки для потенциальных клиентов. Но для полной уверенности в надёжности площадки этого недостаточно.

Большинство дата-центров заявляют, что по категории надежности Tier III их инфраструктура соответствует стандарту. Однако это не всегда так.

Очень затруднительно посещать дата-центры и проверять, так ли это. Проверяющему эксперту потребуются инженерные знания и значительные временные затраты.

Поэтому более надежный и простой способ проверить облачного провайдера – это запросить у него наличие сертификатов, которые подтверждены международной организацией (Uptime Institute).

На официальном сайте института можно посмотреть подтвержденные сертификаты Uptime Institute для российских дата-центров.

Служба поддержки

Если облачный провайдер не будет выстраивать четкие процессы по сопровождению облачной инфраструктуры, то не получится обеспечить высокую доступность. К таким можно отнести управление инцидентами, запросами на обслуживание и управление изменениями.

Облачный провайдер использует единую систему для учета и обработки обращений от пользователей, а также регистрирует сообщения от систем мониторинга. Работа с инцидентами должна быть детально формализована. Это будет давать уверенность в том, что инциденты обрабатываются последовательно, и ни один не будет потерян, а их воздействие и время восстановления будут минимизированы.

Управление изменениями означает, что облачный провайдер использует определенный регламент по проведению изменений в инфраструктуре. Провайдер гарантирует, что какое-либо изменение тщательно протестировано, спланировано, подкреплено надежным планом реагирования в случае инцидента и проведено с минимальными рисками нарушения соглашения об уровне сервиса.

Служба поддержки является непосредственно лицом любого облачного провайдера. Она должна соответствовать следующим требованиям для сопровождения корпоративных облачных услуг:

- доступность по всем каналам в круглосуточном режиме 24/7/365;
- приём по разным каналам заявок: по телефону, по электронной почте, через веб;
- соблюдение и контроль метрик: максимальное время по решению типового запроса, время реакции на обращение, максимальное время по решению инцидента;
- оповещать о случившихся инцидентах и решать их, проводить регламентные работы;
- готовность провайдера помогать в решении проблем, которые выходят за рамки формального описания услуги и договора.

Профиль деятельности компании

Российские компании, которые предоставляют облачные услуги, можно отнести к таким профилям:

- *Специализированные облачные провайдеры.* Это компании, в которых ядром бизнеса является предоставление облачных ИТ-сервисов. Такие компании, как правило, имеют свое оборудование, которое размещено в арендованных дата-центрах.

- *Дата-центры.* С повышением использования облачных услуг всё большее количество дата-центров оказывают в дополнение и услуги по аренде инфраструктуры. Некоторые дата-центры оказывают облачные сервисы самостоятельно, другие – заключают соглашения с провайдерами облачных услуг.

- *Системные интеграторы.* В настоящее время практически каждый только многопрофильный интегратор обзавелся своим собственным облаком. Для такой компании характерно, что работа с облаком является одним из нескольких направлений деятельности и, как правило, этому направлению не уделяется должного внимания.

- *Поставщики (провайдеры) связи.* Одно из главных составляющих стабильной работы со своими виртуальными ресурсами, которые размещены в облаке, – это хороший канал для облака. Поэтому многие провайдеры начинают расширять портфель своих услуг облачными сервисами при поддержке облачных ИТ-провайдеров. Крупные же провайдеры связи делают это самостоятельно.

Вначале облачные ИТ-сервисы располагаются у операторов связи, оказывающих самостоятельно подобные услуги. А более проработанные услуги с организационной и с технической стороны – у компаний, специализирующихся на предоставлении облачных ИТ-сервисов.

Наиболее гибкими и надежными по оказанию облачных услуг считаются те компании, у которых облачные услуги являются основным направлением их деятельности. С точки зрения финансовой стабильности провайдера, положительным является та ситуация, когда помимо предоставления облачных сервисов есть и другие направления деятельности компании, например: разработка программного обеспечения, продажа оборудования и др.

Гипервизор

Напрямую заказчика не интересует, какой именно гипервизор использует сервис-провайдер. Но важно обратить внимание на следующее:

- Если использовать более продвинутый гипервизор, то это позволит обеспечить провайдеру более реальную высокую доступность сервиса, чем указанная в SLA.

- Если использовать более функциональный гипервизор, то это позволит гарантировать провайдеру более высокие показатели производительности виртуальных серверов.

- От выбора гипервизора будут зависеть поддерживаемые операционные системы и их стабильная работа.

- С точки зрения вероятности взломов и информационной безопасности использование разных гипервизоров будет иметь разную степень уязвимости.

Можно сказать, что использование лидирующих облачных провайдеров повышает безопасность, надежность и стабильность работы в облаке.

SLA

Все главные запросы по обслуживанию должны быть зафиксированы в SLA, в котором описаны услуги и целевые параметры по времени решения. Нетиповые запросы по обслуживанию должны иметь фиксированный срок, по которому определяется время планового решения.

Согласованный уровень предоставления сервиса фиксируется в SLA. Каждый провайдер облачных услуг несет финансовую ответственность при нарушении параметров SLA. Помимо этого, провайдеру в случае необходимости нужно обсуждать с клиентом индивидуальные параметры по качеству. Однако наличие компенсаций и SLA само по себе не гарантирует работу процесса управления уровнем сервиса. Для проверки необходимо убедиться в сервис-провайдере, а именно в том, что он постоянно собирает информацию по показателям SLA, проводит ее, анализирует и предпринимает при необходимости корректирующие действия.

Построение агрегированного рейтинга провайдеров облачных услуг методом порогового агрегирования

Классическим решением при построении ранжированного списка альтернатив, оцениваемых по нескольким критериям, является определение взвешенной суммы для каждой альтернативы по критериям и далее упорядочивание по этому значению. Однако у этого метода есть ограничение, которое заключается в необходимости обоснования суммирования и определения весов [4]. В нашей ситуации такого обоснования нет, и поэтому это не даст нам уверенности в том, что суммирование взвешенных оценок будет обоснованным и что это даст осмысленные результаты. Низкие оценки по одному критерию могут быть компенсированы высокими или средними оценками других критериев, что является неприемлемым.

Для устранения таких проблем в работе предлагается построить агрегированный рейтинг, который основан на применении правила порогового агрегирования и используется в задачах многокритериальной оценки. Параметрами, по которым будут оцениваться облачные провайдеры, будут являться рассмотренные выше критерии: используемое оборудование (ИО), производительность дисковой подсистемы (ПДП), надежность площадки (НП), служба поддержки (СП), профиль деятельности компании (ПДК), гипервизор (Г), SLA.

Главной характеристикой предложенного правила является его некомпенсаторный характер, заключающийся в том, что невозможно компенсировать низкое значение одного из критериев более высокими значениями по другим критериям. Благодаря такому свойству уменьшаются возможности самостоятельного улучшения облачным провайдером своего места в рейтинге путем увеличения данных в

своих показателях или указания только максимальных значений.

Правило порогового агрегирования и рейтинговый индекс

Пусть A – конечное множество альтернатив, которые оцениваются по n критериям. В нашей задаче построения агрегированного рейтинга провайдеров облачных услуг альтернативами будут конкретные фирмы-поставщики.

Команда облачной стратегии для рассматриваемых 10 облачных сервис-провайдеров экспертным путем проставляет баллы согласно четырехградационной шкале (табл. 1), где 1 будет соответствовать самой низкой оценке (градации), а 4 – самой высокой.

Таблица 1

Четырехградационная шкала оценок провайдеров

Оценка	Балл	Описание
Отлично	4	Показатель очень высокий, практически идеальный вариант
Хорошо	3	Показатель выше минимальных значений, но не самый лучший вариант
Удовлетворительно	2	Показатель на минимальном удовлетворительном уровне, соответствует минимальным стандартам
Неудовлетворительно	1	Показатель низкий, не соответствует минимальным стандартам

Каждой альтернативе x из A поставлен в соответствие вектор (x_1, \dots, x_n) , где x_i – это ранг провайдера по соответствующему критерию i , т.е. $x_i \in \{1, \dots, 4\}$, $i = 1, \dots, n$.

Задача сводится к тому, чтобы на основании поставленных оценок (x_1, \dots, x_n) командой по облачной стратегии для всех альтернатив x проранжировать множество A , т.е. для каждого провайдера найти его порядковый номер в агрегированном списке рейтинга.

Для каждого $x_j \in A$ пишем $x = (x_1, \dots, x_n)$. Поэтому множество A будет состоять из всех возможных n -мерных векторов вида (x_1, \dots, x_n) .

Для решения такой задачи применим пороговое правило [12–15] и рассчитаем индекс по методу пороговой оценки.

Правило порогового агрегирования состоит в том, что сначала сравниваются числа единиц, т.е. количество оценок «неудовлетворительно», («плохо») в векторах x и y . Если они не равны, то предпочтительнее тот вариант (вектор), который будет иметь меньше единиц (худших оценок). Если в x и y количество единиц поровну, то сравнивается количество средних оценок (число двоек). Тот вариант, у которого их меньше, будет считаться более предпочтительным и т.д. Если количество всех оценок поровну (и единиц, и двоек, и троек, и т.д.), то такие векторы считаются равными и несравнимыми. То есть если плохих оценок поровну, то лучшим будет тот вариант, у которого меньше средних [12].

Пусть m – число градаций, n – число параметров (критериев), $V_j(x)$ – количество рангов j в век-

торе x , т.е. $V_j(x) = \{1 \leq i \leq n: x_i = j\}$. Отметим, что $0 \leq V_j(x) \leq n$ для всех $j \in \{1, \dots, 4\}$ и $x \in A$ и $V_1(x) + \dots + V_4(x) = n$ для всех $x \in A$.

В соответствии с правилом порогового агрегирования, индекс альтернативы будет равен сумме количеств сочетаний из a по b (1):

$$F(x) = \sum_{j=1}^m C_a^{b(j)}, \quad (1)$$

где количество сочетаний доопределено $C_{-1}^0 = 1$, и $C_n^{n+1} = 0$; a и b зависят от j и определены как (2), (3):

$$a(j) = n - V_j(x) + m - j - 1; \quad (2)$$

$$b(j) = m - j; \quad (3)$$

$V_j(x)$ определено как сумма: $V_j(x) = \sum_{q=1}^j \eta(q)$ и

$$\sum_{j=1}^m V_j(x) = n.$$

$\eta(q)$ определено как количество параметров, по которым данная альтернатива имеет значение q (q : градация от 1 до m).

После нахождения количества сочетаний a по b находим C по формуле комбинаторики (4):

$$C_a^b = \frac{a!}{b!(a-b)!}. \quad (4)$$

Функция предпочтения F в явном виде (для $m \geq 4$) представлена в работах [13, 15]. Подставив (2) и (3) в (1), получим комбинаторную формулу (5):

$$F(x) = \sum_{j=1}^m C_{n-V_j(x)+m-j-1}^{m-j} = \sum_{j=1}^m C_{n-(\eta(1)+\eta(2)+\dots+\eta(j))+m-j-1}^{m-j}. \quad (5)$$

В рамках нашей модели рейтингования провайдеров облачных услуг здесь n – число критериев для оценки, $m = 4$ – количество градаций (оценок). В нашем случае 1, 2, 3, 4. $V_j(x)$ – количество оценок j у провайдера x . Функция $F(x)$ принимает натуральное значение на любом векторе x , равное порядковому номеру этого вектора в описанном выше строгом предпочтении. Функция F обладает оптимальными свойствами, такими как Парето-доминирование, симметрия и др. [12–14].

Нормированный индекс предпочтения по методу порогового агрегирования будет равен

$$I_{\text{Threshold}} = \frac{F}{F_{\text{max}}}, \quad (6)$$

где F_{max} – это максимальное значение индекса предпочтения. Нормированный индекс меняется от 0 до 1, и соответственно чем выше значение индекса, тем выше будет оценка.

Построение агрегированного рейтинга

В исследовании рассматривались данные 10 провайдеров облачных услуг, реально существующих на российском рынке. Каждый провайдер будет оцениваться по рассмотренным ранее 7 критериям.

Для идентификации провайдеров присвоены номера от 1 до 10 в соответствии с числом рассматриваемых поставщиков. Поскольку большая часть показателей являются качественными, за исключением некоторых показателей, характеризующих скорость, но в целом описывающих качественный критерий, то применим сразу экспертные оценки по шкале (см. табл. 1) и занесем их в табл. 2.

Таблица 2

Баллы критериев для рассматриваемых провайдеров

№	Провайдер	Критерии оценки						
		ИО	ПДП	НП	СП	ПДК	Г	SLA
1	ИТ-Град	4	4	4	4	2	3	2
2	Cloud4Y	3	4	4	4	4	4	3
3	Софтлайн	4	4	4	4	3	3	2
4	Мастерхост	1	4	2	4	3	3	3
5	Amazon	3	4	4	4	3	4	3
6	Microsoft	3	4	4	4	3	3	3
7	Ростелеком	3	4	3	4	3	3	3
8	Стек Групп	2	4	3	4	2	3	3
9	Даталайн	3	4	3	4	3	3	3
10	Selectel	4	4	4	4	4	3	4

Проиллюстрируем положение векторов в рейтинге в зависимости от их оценок, представленных в табл. 2, для нашего варианта, используя рассмотренный выше некомпенсаторный метод рейтингования.

$$(1, 2, 3, 3, 3, 4, 4)_1^4, (2, 2, 3, 3, 3, 4, 4)_2^8,$$

$$(2, 2, 3, 4, 4, 4, 4)_3^1, (2, 3, 3, 4, 4, 4, 4)_4^3,$$

$$(3, 3, 3, 3, 3, 4, 4)_5^7, (3, 3, 3, 3, 3, 4, 4)_6^9,$$

$$(3, 3, 3, 3, 4, 4, 4)_7^6, (3, 3, 3, 4, 4, 4, 4)_8^5,$$

$$(3, 3, 4, 4, 4, 4, 4)_9^2, (3, 4, 4, 4, 4, 4, 4)_{10}^{10}.$$

Нижний индекс справа указывает порядковый номер у вектора в рейтинге. Верхний индекс справа указывает порядковый номер провайдера в табл. 2.

Теперь рассчитаем индекс предпочтения по формуле (5). Рассмотрим пример расчета для максимума значений индекса.

Для количества параметров $n = 7$ и числа градаций $m = 4$ находим индекс лучшей альтернативы, т.е. альтернативы, у которой все значения = 4.

$$\eta(1) = \eta(2) = \eta(3) = 0;$$

$$\eta(4) = 7;$$

$$V(1) = V(2) = V(3) = 0;$$

$$V(4) = 7;$$

$$a(1) = n - V(1) + m - j - 1 = 7 - 0 + 4 - 1 - 1 = 9;$$

$$a(2) = 7 - 0 + 4 - 2 - 1 = 8;$$

$$a(3) = 7 - 0 + 4 - 3 - 1 = 7;$$

$$a(4) = 7 - 7 + 4 - 4 - 1 = -1;$$

$$b(1) = m - 1 = 4 - 1 = 3;$$

$$b(2) = 4 - 2 = 2;$$

$$b(3) = 4 - 3 = 1;$$

$$b(4) = 4 - 4 = 0.$$

Индекс лучшей альтернативы:

$$F_{\max} = C_9^3 + C_8^2 + C_7^1 + C_{-1}^0.$$

Приведем подробный пример расчета отношения C_9^3 по формуле (4):

$$C_9^3 = \frac{9!}{3!(9-3)!} = \frac{6 \times 7 \times 8 \times 9}{3 \times 6!} = \frac{504}{6} = 84.$$

Итак, $F_{\max} = 84 + 28 + 7 + 1 = 120$.

То есть, максимальное значение индекса – 120.

Рассчитаем теперь индекс предпочтительности для провайдера с наихудшими оценками, имеющего порядковый номер 1 в рейтинге:

$$\eta(1) = 1; \eta(2) = 1; \eta(3) = 3; \eta(4) = 2;$$

$$V(1) = 1; V(2) = 2; V(3) = 5; V(4) = 7;$$

$$a(1) = n - V(1) + m - j - 1 = 7 - 1 + 4 - 1 - 1 = 8;$$

$$a(2) = 7 - 2 + 4 - 2 - 1 = 6;$$

$$a(3) = 7 - 5 + 4 - 3 - 1 = 2;$$

$$a(4) = 7 - 7 + 4 - 4 - 1 = -1;$$

Значения $b(1-4)$ будут такими же.

Индекс для альтернативы с порядковым номером 1 в рейтинге:

$$F_1 = C_8^3 + C_6^2 + C_2^1 + C_{-1}^0 = 56 + 15 + 2 + 1 = 74.$$

Тогда нормированное значение согласно формуле (6)

$$I_1 = \frac{74}{120} = 0,617.$$

Аналогично рассчитываем другие индексы, находим нормированные значения и заносим результаты в табл. 3. Для упрощения расчетов воспользуемся средствами Microsoft Excel.

Таблица 3

Рейтинг провайдеров со значениями функций предпочтения

№	Провайдер	Значение функции $F(x)$ (индекса предпочтения)	Нормированное значение индекса предпочтения
1	Selectel	119	0,992
2	Cloud4Y	118	0,983
3	Amazon	117	0,975
4	Microsoft	116	0,967
5	Даталайн	115	0,958
6	Ростелеком	115	0,958
7	Софтлайн	110	0,917
8	ИТ-Град	104	0,867
9	Стек Групп	102	0,85
10	Мастерхост	74	0,617

На рис. 1 представлен рейтинг провайдеров услуг в виде графика.

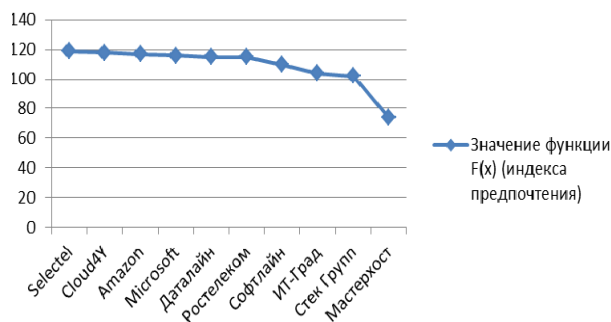


Рис. 1. График рейтинга провайдеров облачных услуг

Исходя из проведенных расчетов по методу порогового агрегирования, наилучшим провайдером облачных услуг является Selectel со значением функции предпочтения, равной 119. Наихудшим из рассматриваемых является Мастерхост со значением 74.

Заключение

Предложена модель выбора провайдеров облачных услуг на основе применения метода порогового агрегирования, который используется в задачах многокритериального оценивания. На основе предложенной модели построен рейтинг, отражающий сравнительную значимость различных провайдеров облачных услуг для предприятия.

Использование рейтингового индекса на основе правила порогового агрегирования выражает не только количественные, но и качественные рейтинговые показатели, а также более чувствительно (по сравнению с другими методами) учитывает веса оценок.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-07-00031 «Модели, алгоритмы и программное обеспечение системы поддержки принятия стратегических решений к переходу на облачные технологии».

Литература

1. Исследование TAdviser: Самые зрелые провайдеры облачных сервисов в России, 10.10.2018 // TAdviser [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/index.php/>, свободный (дата обращения: 23.10.2018).
2. Разумников С.В. Разработка модели процесса формирования облачной ИТ-стратегии // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сб. тр. XV Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. С.У. Увайсова. – М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2018. – С. 118–122.
3. Разумников С.В. Разработка ИТ-стратегии и проектирование частной облачной среды на предприятии // Инновационные технологии в машиностроении: сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. – 2018. – С. 200–202.
4. Разумников С.В. Интегральная модель оценки результативности внедрения облачных ИТ-сервисов // Научные труды Волевого экономического общества России. – 2016. – Т. 201, № 4. – С. 492–504.
5. Алескеров Ф.Т. Пороговое агрегирование трехградационных ранжировок / Ф.Т. Алескеров, Д.А. Юзбашев, В.И. Якуба // Автоматика и телемеханика. – 2007. – Выпуск 1. – С. 147–152.
6. Aleskerov F. A threshold aggregation of three-graded rankings / F. Aleskerov, V. Yakuba, D. Yuzbashev // Math. Social Sci. 53–2007. – P. 106–110.
7. Aleskerov F. The threshold aggregation / F. Aleskerov, V.V. Chistyakov, V.A. Kalyagin // Econ. lett. 107. – 2010. – No. 2. – P. 161–162.
8. Aleskerov F. Social threshold aggregations / F. Aleskerov, V. Chistyakov, V. Kalyagin // Social Choice and Welfare. – 2010. – Vol. 35, № 4. – P. 627–646.
9. Гачко Д. IaaS для бизнеса по кирпичикам / Д. Гачко, А. Стародобцев // ИТ-ГРАД. – СПб., 2014. – 25 с.
10. A cloud server energy consumption measurement system for heterogeneous cloud environments / W. Lin, H. Wang, Y. Zhang, D. Qi et al. // Information Sciences. – Vol. 468. – November 2018. – P. 47–62.

11. Управление IOPs при аренде виртуальной инфраструктуры. How many IOPs is enough? // IT-GRAD [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.it-grad.ru/competence-center/technical-blog/14/>, свободный (дата обращения: 23.10.2018).

12. Алескеров Ф.Т. Бинарные отношения, графы и коллективные решения / Ф.Т. Алескеров, Э.Л. Хабина, Д.А. Шварц. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2012. – 344 с.

13. Калягин В.А. Аксиоматическая модель некомпенсаторного агрегирования: Препринт WP7/2009/01 / В.А. Калягин, В.В. Чистяков. – М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2009. – 76 с.

14. Оценка вклада научных работников методом порогового агрегирования / Ф.Т. Алескеров, Е.С. Катаева, В.В. Писляков, А.И. Якуба // Управление большими системами. Спец. вып. 44: Наукометрия и экспертиза в управлении наукой. – 2013. – С. 172–189.

15. Гончаров А.А. Некомпенсаторное агрегирование и рейтингование студентов / А.А. Гончаров, В.В. Чистяков // XI Междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества: в 3 кн. / отв. ред. Е.Г. Ясин; Высшая школа экономики. – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2011. – С. 89–99.

Разумников Сергей Викторович

Канд. техн. наук, доцент отделения цифровых технологий Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленинградская ул., д. 26, г. Юрга, Россия, 652057
Тел.: +7 (384-5) 17-77-64
Эл. почта: demolove7@inbox.ru

Razumnikov S.V.

Noncompensatory aggregation and rating of cloud service providers

As the trend towards the transfer of applications and tasks to the cloud expands, manufacturers are increasingly emphasizing partnerships with cloud service providers. When choosing a cloud service provider, customers often compare the various parameters of the sites on which the cloud is deployed. The paper proposes a model for choosing cloud service providers based on the use of the threshold aggregation method, which is used in multi-criteria evaluation tasks. The main characteristic of the proposed method is its non-compensatory nature. It is impossible to compensate for the low value of the criterion used by the high values of other criteria. Based on the proposed model, a rating is constructed reflecting the relative importance of various cloud service providers for the enterprise.

Keywords: cloud technologies, model, provider, service, choice, non-compensatory, rating, threshold aggregation method.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-63-69

References

1. Issledovanie TAdviser: Samye zrelye provajdery oblachnyh servisov v Rossii [The most mature cloud service providers in Russia]. TAdviser, 10.10.2018. Available at: <http://www.tadviser.ru/index.php/> (accessed: October 23, 2018).

2. Razumnikov S.V. Razrabotka modeli processa formirovaniya oblachnoj IT-strategii [Development of a model for the formation of a cloud IT strategy]. Sbornik trudov XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «*Innovacionnyye, informacionnye i kommunikacionnye tekhnologii*» [Proceedings of the XV International Scientific Practical Conference «Innovative, information and communication technologies»]. Sochi, 2018, pp. 118–122 (in Russ.).
 3. Razumnikov S.V. Razrabotka IT-strategii i proektirovanie chastnoj oblachnoj sredy na predpriyatii [Developing an IT strategy and designing a private cloud environment in an enterprise]. Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «*Innovacionnyye tekhnologii v mashinostroenii*» [Proceedings of the IX International Scientific Practical Conference «Innovative technologies in mechanical engineering»]. Yurga, 2018, pp. 200–202 (in Russ.).
 4. Razumnikov S.V. [Integrated model for assessing the impact of cloud IT services implementation]. *Scientific works of the Free Economic Society of Russia*, 2016, vol. 201, no. 4, pp. 492–504 (in Russ.).
 5. Aleskerov F.T., Yuzbashev D.A., Yakuba V.I. Porogovoe agregirovanie trekhgradacionnyh ranzhirovok [Threshold aggregation of three-grade rankings]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2007, vol. 1, pp. 147–152 (in Russian).
 6. Aleskerov F., Yakuba V., Yuzbashev D. A threshold aggregation of three-graded rankings. *Math. Social Sci.* 53, 2007, pp. 106–110.
 7. Aleskerov F., Chistyakov V.V., Kalyagin V.A. The threshold aggregation. *Econ. lett.* 107, 2010, № 2, pp. 161–162.
 8. Aleskerov F., Chistyakov V., Kalyagin V. *Social threshold aggregations // Social Choice and Welfare*. 2010, vol. 35, №4, pp. 627–646.
 9. Gachko D., Starodobcev A. *IaaS dlya biznesa po kirpichikam* [IaaS for business by brick]. IT-GRAD, Saint-Petersburg, 2014 g., 25 p. (in Russ.).
 10. Lin W, Wang H., Zhang Y., Qi D., Wang J.Z., Chang V. A cloud server energy consumption measurement system for heterogeneous cloud environments. *Information Sciences*, 2018, vol. 468, pp. 47–62.
 11. Upravlenie IOPs pri arende virtual'noj infrastruktury. How many IOPs is enough? [Managing IOPs when renting a virtual infrastructure]. IT-GRAD. Available at: <https://www.it-grad.ru/competence-center/technical-blog/14/> (accessed: October 23, 2018).
 12. Aleskerov F.T., Habina E.H.L., Shvarc D.A. *Binary relationships, graphs and collective solutions*, 2012, 344 p. (in Russ.).
 13. Kalyagin V.A., Chistyakov V.V. *Axiomatic model of non-compensatory aggregation. Preprint*, 2009, 76 p. (in Russ.).
 14. Aleskerov F.T., Kataeva E.S., Pislyakov V.V., Yakuba A.I. Ocenka vklada nauchnyh rabotnikov metodom porogovogo agregirovaniya [Assessment of the contribution of researchers by the method of threshold aggregation]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Large system management]. 2013, pp. 172–189.
 15. Goncharov A.A., Chistyakov V.V. Nekompensatornoe agregirovanie i rejtingovanie studentov [Noncompensatory aggregation and rating of students]. *XI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya po problemam razvitiya ehko-nomiki i obshchestva* [XI International Scientific Conference on Economic and Social Development]. 2011, pp. 89–99.
-

Sergey V. Razumnikov

Candidate of Engineering, Associate Professor,
Department of Digital Technology,
Yurga Technological Institute (branch)
of the National Research Tomsk Polytechnic University
26, Leningradskaya st., Yurga, Russia, 652055
Phone: +7 (384-5) 17-77-64
Email: demolove7@inbox.ru

УДК 528.8

П.Е. Густокашин, М.Ю. Катаев

Сравнительный анализ аэрозольной оптической толщи из спутниковых продуктов MODIS и CALIPSO уровня L2

Аэрозольная оптическая толщина является значимым климатическим параметром, который определяет состояние атмосферы наряду с газовым составом и облаками. Изучение изменений этого параметра в зависимости от разнообразных условий является важной научной задачей. Приводится сравнение временной динамики аэрозольной оптической толщи атмосферы на территории Западной Сибири, полученной по данным спутниковых приборов CALIPSO (лидарные сигналы) и MODIS (многоспектральные изображения) по данным уровня L2. Приводится описание спутникового прибора MODIS, который измеряет интегральную по всей атмосфере оптическую толщину аэрозоля и прибора CALIPSO, который измеряет высотные профили коэффициента рассеяния аэрозоля. Показано, что между измерениями этих приборов наблюдается согласие за период 3 года.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, атмосфера, лидарное зондирование, спутниковые многоспектральные изображения.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-70-74

Оперативные количественные оценки аэрозольной оптической толщи (АОТ) в атмосфере, включая пространственно-временное распределение, являются важной научно-практической задачей [1]. Целью представляемых исследований является получение временного распределения АОТ в пространстве Западной Сибири по данным различных спутниковых приборов. Из числа существующих оперативных продуктов, получаемых из обработки спутниковых измерений, наибольший интерес представляют данные инструментов MODIS и CALIPSO, входящих в состав американо-французской орбитальной группировки спутников A-train (подробная информация на <http://atrain.nasa.gov/>). Спутники из группы A-train пролетают над одной и той же точкой земной поверхности несколько раз в день (максимально 14), что позволяет сформировать детальную картину атмосферы в зоне пролета.

Спутник Aqua с инструментом MODIS приблизительно в 11 утра местного времени пролетает территорию Западной Сибири, и данные по аэрозолям, облачной фазе и оптические параметры облаков доступны только в дневное время [<http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>] в полосе шириной 2300 км. Алгоритмы обработки данных измерений MODIS используют мультиспектральное излучение для того, чтобы определить тип аэрозоля и суммарную оптическую толщину. Лидарные данные можно получить из продуктов спутникового прибора CALIPSO (включает лидар CALIOP), которые включают в себя: облачные свойства, интегрированное ослабленное обратное рассеяние, коэффициент деполаризации лидарного сигнала, оптическую толщину аэрозоля, коэффициенты обратного рассеяния, температуру и высоту облачного слоя, среднюю в высотном диапазоне 0–25 км [<https://www-calipso.larc.nasa.gov>].

Сравнение оптической толщи аэрозоля с инструментами MODIS и CALIOP позволяет уточнить информацию о качественном пространственно-временном представлении распределения АОТ. Получаемые косвенные измерения должны проходить

верификацию, поэтому важно проводить сравнительный анализ результатов измерений различных приборных систем.

Описание спектро радиометра MODIS

Спектро радиометр MODIS расположен на борту спутников Terra и Aqua, которые являются частью комплексной программы NASA EOS (Earth Observing System), направленной на исследования суши, воды и атмосферы. Спутник Terra был запущен в 1999 г., а Aqua – в 2002 г. MODIS имеет 36 спектральных каналов (от 0,41 до 14,0 мкм) с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем инфракрасном диапазонах и позволяет производить регулярную съемку одной территории с пространственным разрешением до 250, 500 и 1000 м. Оба спутниковых прибора решают общие задачи и среди них – получение изображений атмосферной аэрозольной оптической толщи. Другой не менее важной задачей является получение информации о том, как формируются и развиваются облака, как они влияют на погоду, климат и количество осадков. Спутниковый прибор MODIS позволяет получать информацию о пространственно-временном распределении (изображения) аэрозольной оптической толщи [2, 3]. Над поверхностью суши, вне территории, закрытой облачными образованиями, оптическая плотность аэрозоля измеряется на следующих длинах волн: 0,47, 0,55 и 0,66 мкм [3].

Описание CALIPSO

Спутниковый прибор CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) – американо-французский исследовательский спутник, был запущен в 2006 г. Прибор решает общие задачи: получение изображений облаков (прибор широкополосной камеры WFC) и профилей атмосферных аэрозолей (лидара CALIOP [4–7]). Спутниковые лидарные измерения обратного рассеяния, распределенного по высоте, не зависят от отражения от поверхности и требуют необходимости определения аэрозольного отношения (an aerosol extinction-to-backscatter ratio). Величину аэрозольного отноше-

ния определяют на длинах волн (532 и 1064 нм) и по её значению выделяют следующие классы: пыль, континентальный аэрозоль, загрязненная пыль (от выбросов лесных пожаров), дым (от лесных пожаров), чистый континентальный аэрозоль, чистый морской аэрозоль [4]. Тогда как данные по аэрозольной оптической толщине, полученные с MODIS, представляют собой двумерное поле (изображение), интегрированное по высоте, то данные, получаемые с помощью лидара CALIOP, представляют высотные профили коэффициентов обратного рассеяния по слою, с горизонтальным усреднением от 1/3 до 80 км.

Данные со спутниковых приборов MODIS и CALIOP

Сравнительному анализу данных спутниковых приборов посвящены работы [8–14]. И лишь только одна работа [13] связана со сравнительным анализом данных об атмосферной аэрозольной толщине для территории земного шара. Поэтому интересным является сравнительный анализ АОТ указанных спутниковых приборов для территории Западной Сибири. В работе используются данные MODIS второго уровня MOD04, которые генерируются с пространственным разрешением 3×3 км. Данные со спутникового прибора CALIOP поступают из одной и той же географической точки каждые 16 дней и расположены в продукте CALIPSO CALIOP L2 Lidar Standard. Минимальное разрешение в этом продукте составляет 333 м.

Выбор территории сравнения данных

В качестве сравниваемых возьмем данные приборов MODIS и CALIOP для территории Западной Сибири (координаты 54–60° с.ш., 80–88° в.д.) за 2015–2017 гг. На рис. 1 представлены траектории движения CALIPSO над территорией Западной Сибири и площадь данных MODIS (прямоугольник).

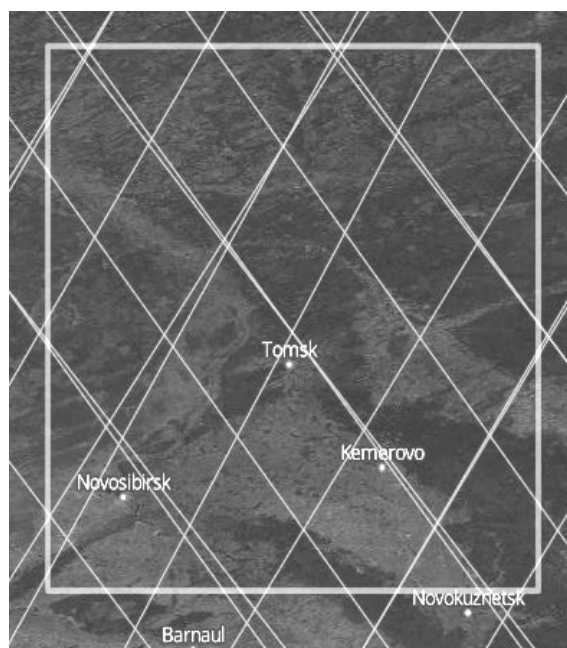


Рис. 1. Траектории движения спутника CALIPSO над территорией Западной Сибири за год и область наблюдений MODIS (прямоугольник)

Из рис. 1 видно, что траектории измерений CALIPSO попадают в изображение MODIS на редкой пространственной сетке.

Описание программы

Для визуализации данных CALIOP и MODIS была разработана программа [15], которая позволяет выбирать из продуктов второго уровня данные измерений для их дальнейшего сравнения. Данные со спутникового прибора CALIPSO, включающего лидар CALIOP, представляют собой профиль аэрозольной оптической толщины в тропосфере и нижней части стратосферы с длиной волны 1064 нм. Данные с прибора MODIS представляют собой изображение, покрывающее большую часть Западной Сибири. Чтобы сравнить данные этих спутниковых приборов, необходимо найти на изображении MODIS точки, которые соответствуют точкам измерений CALIOP для безоблачных областей.

Структура программы приведена на рис. 2. Для автоматического считывания данных спутниковых приборов, организации хранения, обработки и анализа была написана программа, состоящая из следующих модулей: 1) модуль чтения; 2) модуль обработки; 3) модуль вывода; 4) модуль управления. Модули вывода, обработки и чтения являются независимыми и обособленными. Модуль управления является единственным модулем, знающим про остальные и служащим для передачи данных между остальными модулями. Модуль управления предназначен для приема основной части команд терминала, их обработки, управления запуском других модулей и хранения промежуточных данных.

Управление программой основано на вызове определенных модулей с помощью команд. Команды бывают следующих типов: «read calipso» – вызывает модуль чтения для считывания файлов со спутникового прибора CALIOP. «read modis» – вызывает модуль чтения для считывания файлов со спутникового прибора MODIS. «read all» – вызывает модуль чтения для считывания файлов со спутникового прибора CALIOP и MODIS. «process calipso» – вызывает модуль обработки для обработки считанных ранее файлов со спутникового прибора CALIOP. «process modis» – вызывает модуль обработки для обработки считанных ранее файлов со спутникового прибора MODIS. «process all» – вызывает модуль обработки для обработки считанных ранее файлов сначала со спутникового прибора CALIOP, а затем со спутникового прибора MODIS. «out calipso» – вызывает модуль вывода для вывода считанных и обработанных ранее файлов со спутникового прибора CALIOP. «out modis» – вызывает модуль вывода для вывода считанных и обработанных ранее файлов со спутникового прибора MODIS. Команда «out all» – вызывает модуль вывода для вывода считанных и обработанных ранее файлов сначала со спутникового прибора CALIOP, а затем со спутникового прибора MODIS.

Если была введена некорректная команда или данные, нужные для выполнения команды, не были получены, то пользователь получает сообщение об ошибке, и модуль начинает ожидание следующей команды от пользователя. После анализа команды

происходит вызов соответствующего модуля. После выполнения задачи вызванного модуля, происходит сохранение полученных от него данных, а затем ожидание следующей команды от пользователя.

Полученные результаты

Для анализа пространственно-временных данных спутниковых приборов выбираются временные отрезки, когда над определенной территорией изображения MODIS, для которой наблюдается безоб-

лачная ситуация, существует измерений CALIOP. Затем найденные измерения CALIOP интегрируются, получая значение AOT в слое атмосферы 0–25 км. Учитывая, что 70% всей аэрозольной массы расположено в 10-километровом нижнем слое атмосферы [16], то полученное значение будет весьма близко к AOT, полученной с борта MODIS. На рис. 3 показано изменение AOT (Optical_Depth_Aerosols_Land), полученного по данным MODIS.

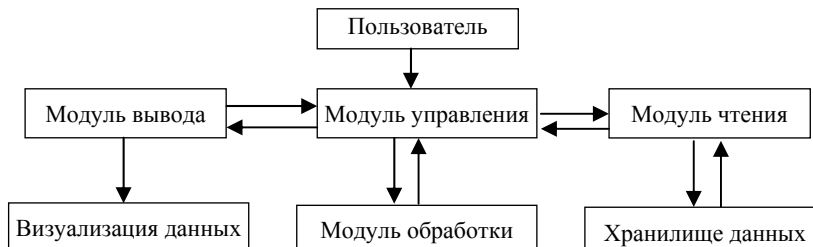


Рис. 2. Структура программы

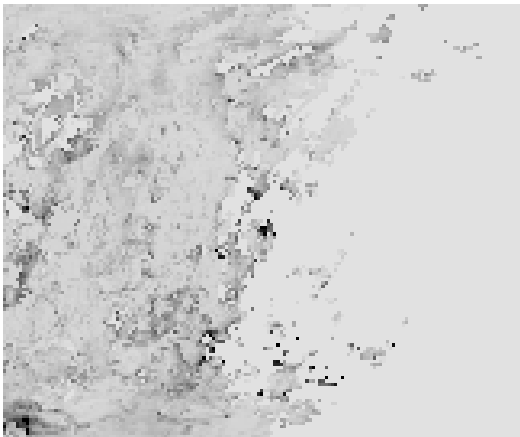


Рис. 3. Изображение AOT по траектории пролета MODIS над территорией Западной Сибири согласно данным продукта MOD04

Для сравнения данных со спутниковых приборов MODIS и CALIOP необходимо выполнить совмещение пространственных сеток, так как AOT для первого спутника дана на пространственной сетке с шагом 3 км, а для лидара – 333 м. Таким образом, необходимо учитывать, что лидарная сетка (часть траектории, связанная с безоблачной областью) увеличивается в 9 раз ($0,333\text{ м} \times 9 \sim 3\text{ км}$). При этом, согласно рис. 1, траектории перемещения лидара пересекают область измерений MODIS, что также приводит к контролю попадания пикселя CALIOP в тот или иной пиксель изображения MODIS.

Результаты выбранных значений AOT от двух спутниковых приборов за 2015, 2016 и 2017 гг. представлены на рис. 4, где видно, что величины AOT спутниковых приборов MODIS (сплошная линия) и CALIOP (пунктирная линия) по значению и поведению во многом идентичны. Видно, что число точек, в которых выполнен сравнительный анализ незначительное, что связано с тем, что над территорией Западной Сибири наблюдается 60–90 безоблачных дней. Отметим, что в 2015 и 2017 гг.,

величины AOT были приблизительно одинаковы и составляют примерно 0.05 для MODIS и 0.015 для CALIOP. В начале 2016 г. значения были такими же, однако во второй половине года (август–октябрь) наблюдалось увеличение примерно в три раза.

Заключение

Проведенный анализ показал перспективность комбинирования данных пассивных и активных спутниковых приборов по изучению аэрозольной оптической толщи. Статистический анализ собранного многолетнего массива данных, совмещенных в пространстве измерений MODIS и CALIPSO (CALIOP), существенно облегчает интерпретацию временных данных AOT за счет вертикального распределения аэрозольного ослабления в атмосфере. Такое совмещение позволяет получить трехмерное разрешение поведения аэрозольной оптической толщи.

В то же время следует отметить, что между различными спутниковыми данными существует некоторая несогласованность, которая связана с пространственным и временным разрешением (частотой наблюдения и временем пролета), спектральными свойствами приборов и недостатками алгоритмов обработки. Однако тем не менее данные сравнения позволяют получить физически корректную модель пространственно-временного изменения свойств атмосферного аэрозоля.

Данная работа выполняется в центре космического мониторинга Земли ТУСУРа и в рамках проекта РФФИ №16-05-00901 «Механизмы, закономерности и особенности формирования стратосферного и мезосферного аэрозоля над территорией Сибири и Дальнего Востока» и государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 8.8184.2017/8.9 «Методология создания систем энергогенерирующих и энергопреобразующих устройств для наземных и бортовых комплексов наземного, космического и подводного базирования».

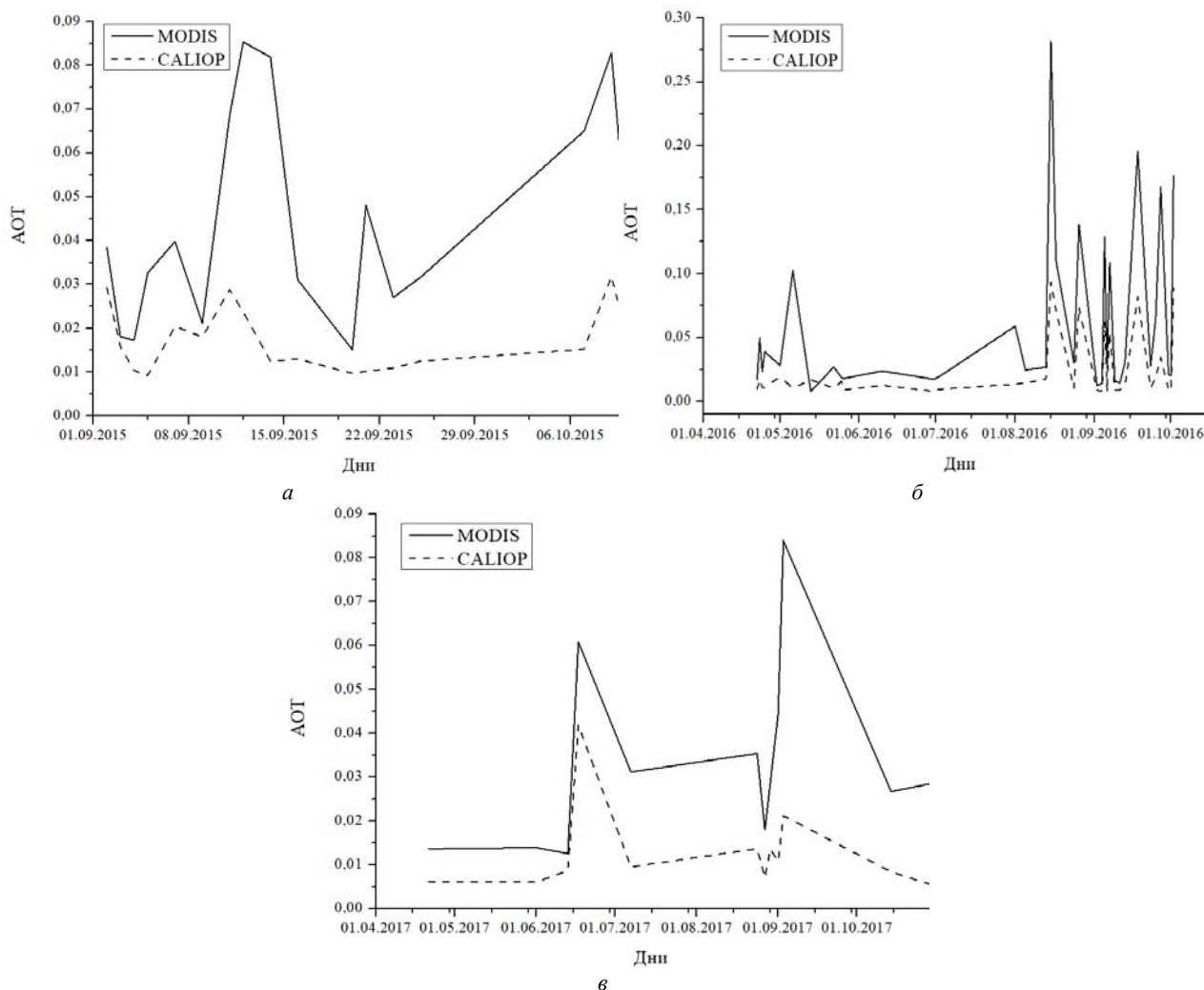


Рис. 4. Результаты сопоставления данных от спутниковых приборов MODIS и CALIOP за 2015 (а), 2016 (б), 2017 (в) гг.

Литература

1. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики / Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев. – СПб.: Наука, 2000. – 475 с.
2. Remer L.A. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation // J. Atmos.Sci. – 2005. – Vol.62. – P. 947–973.
3. Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multiangle imaging / J.V. Martonchik, D.J. Diner, R.A. Kahn et al. // IEEE Trans on Geosci. and Remote Sens. – 1998. – Vol. 36. – P. 1212–1227.
4. The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm / A. Omar, D. Winker, C. Kittaka, M. Vaughan et al. // J. Atmos. Ocean. Tech. – 2009. – Vol. 26. – P. 1994–2014.
5. Temporal variability of aerosol optical thickness vertical distribution observed from CALIOP / T.D. Toth, J. Zhang, J.R. Campbell, J.S. Reid, M.A. Vaughan // J. Geophys. Res. Atmos. – 2016. – Vol. 121. – P. 9117–9139.
6. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms / D.M. Winker, M.A. Vaughan, A. Omar, Y. Hu et al. // J. Atmos. Ocean. Tech. – 2009. – Vol. 26. – P. 2310–2323.
7. The global 3-D distribution of tropospheric aerosols as characterized by CALIOP / D.M. Winker, J.L. Tackett, B.J. Getzewich, Z. Liu et al. // Atmos. Chem. Phys. – 2013. – Vol. 13. – P. 3345–3361.

8. Synergy between CALIOP and MODIS instruments for aerosol monitoring: application to the Po Valley / P. Royer, J.-C. Raut, G. Ajello, S. Berthier, P. Chazette // Atmos. Meas. Tech. – 2010. – Vol. 3. – P. 893–907.
9. A novel method for estimating shortwave direct radiative effect of above-cloud aerosols using CALIOP and MODIS data / Z. Zhang, K. Meyer, S. Platnick, L. Oreopoulos, D. Lee, H. Yu // Atmos. Meas. Tech. – 2014. – Vol. 7. – P. 1777–1789.
10. Costantino L. Aerosol indirect effect on warm clouds over South-East Atlantic, from co-located MODIS and CALIPSO observations / L. Costantino, F.-M. Breon // Atmos. Chem. Phys. – 2013. – Vol. 13. – P. 69–88.
11. Meyer K. Estimating the direct radiative effect of absorbing aerosols overlying marine boundary layer clouds in the southeast Atlantic using MODIS and CALIOP / K. Meyer, S. Platnick, L. Oreopoulos, D. Lee // J. Geophys. Res. Atmos. – 2013. – Vol. 118. – P. 4801–4815.
12. Varnai T. Analysis of co-located MODIS and CALIPSO observations near clouds / T. Varnai, F. Marshak // Atmos. Meas. Tech. – 2012. – Vol. 5. – P. 389–396.
13. Kittaka C. Intercomparison of column aerosol optical depths from CALIPSO and MODIS-Aqua / C. Kittaka, D.M. Winker, M.A. Vaughan, A. Omar, L.A. Remer // Atmos. Meas. Tech. – 2011. – Vol. 4. – P. 131–141.
14. Chan M.A. Arctic Cloud Characteristics as Derived from MODIS, CALIPSO, and CloudSat // Journal of climate. – 2013. – Vol. 26. – P. 3285–3306.

15. Густокашин П.Е., Программное обеспечение чтения данных MODIS (продукт MOD04) и CALIPSO / П.Е. Густокашин, М.Ю. Катаев // XVI Междунар. науч.-практ. конф. – М.: МЦНО, 2018. – Т. 16, № 6. – С. 6–10.

16. Ивлев Л.С., Довгалонок Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.

Густокашин Павел Евгеньевич

Магистрант каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: (382-2) 70-15-36
Эл. почта: diwixis@mail.ru

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. АСУ ТУСУРа,
профессор Юргинского технологического института,
ф-ла Национального исследовательского
Томского политехнического университета
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Gustokashin P.E., Kataev M.Yu.

Comparative analysis of aerosol optical thickness from MODIS and CALIPSO L2 satellite products

Aerosol optical thickness is a significant climatic parameter that determines the state of the atmosphere along with gas composition and clouds. The study of changes in this parameter, depending on a variety of conditions is an important scientific task. This paper compares the temporal dynamics of an aerosol optical thickness of the atmosphere in Western Siberia, obtained from satellite data CALIPSO (lidar signals) and MODIS (multi-spectral images) according to L2 data. A description is given of the satellite instrument MODIS, which measures the optical thickness of the aerosol integrated over the entire atmosphere and the instrument CALIPSO, which measures the height profiles of the aerosol dispersion coefficient. It is shown that there is a correlation between the measurements of these devices over a period of 3 years.

Keywords: aerosol optical thickness, atmosphere, lidar sensing, satellite multispectral images.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-70-74

References

1. Timofeev Yu.M., Vasilyev A.V. *T Teoreticheskie osnovy atmosfernoj optiki*. SPb, Science, 2000. 475 p.
2. Remer L.A. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *J. Atmos. Sci.* 2005. vol. 62, pp. 947–973.
3. Martonchik J.V., Diner D.J., Kahn R.A., Ackerman T.P., Verstraete M.M., Pinty B., Gordon H.R. Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multiangle imaging. *IEEE Trans on Geosci. and Remote Sens.* 1998, vol. 36, pp. 1212–1227.
4. A. Omar, D. Winker, C. Kittaka, M. Vaughan et al. The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2009, vol. 26, pp. 1994–2014.
5. Toth T.D., Zhang J., Campbell J.R., Reid J.S., Vaughan M.A. Temporal variability of aerosol optical thickness vertical distribution observed from CALIOP. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016, vol. 121, pp. 9117–9139.

6. A. Omar, D. Winker, C. Kittaka, M. Vaughan et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2009, vol. 26, pp. 2310–2323.

7. Winker D.M., Tackett J.L., Getzewich B.J., Liu Z., Vaughan M.A., Rogers R.R. The global 3-D distribution of tropospheric aerosols as characterized by CALIOP. *Atmos. Chem. Phys.* 2013, vol. 13, pp. 3345–3361.

8. Royer P., Raut J.-C., Ajello G., Berthier S. Chazette P. Synergy between CALIOP and MODIS instruments for aerosol monitoring: application to the Po Valley. *Atmos. Meas. Tech.* 2010, vol. 3, pp. 893–907.

9. Zhang Z., Meyer K., Platnick S., Oreopoulos L., Lee D., Yu H. A novel method for estimating shortwave direct radiative effect of above-cloud aerosols using CALIOP and MODIS data. *Atmos. Meas. Tech.* 2014, vol. 7, pp. 1777–1789.

10. Costantino L., Breon F.-M. Aerosol indirect effect on warm clouds over South-East Atlantic, from co-located MODIS and CALIPSO observations. *Atmos. Chem. Phys.* 2013, vol. 13, pp. 69–88.

11. Meyer K., Platnick S., Oreopoulos L., Lee D. Estimating the direct radiative effect of absorbing aerosols overlying marine boundary layer clouds in the southeast Atlantic using MODIS and CALIOP. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 2013, vol. 118, pp. 4801–4815.

12. Varnai T., Marshak F. Analysis of co-located MODIS and CALIPSO observations near clouds. *Atmos. Meas. Tech.* 2012, vol. 5, pp. 389–396.

13. Kittaka C., Winker D.M., Vaughan M.A., Omar A., Remer L.A. Intercomparison of column aerosol optical depths from CALIPSO and MODIS-Aqua. *Atmos. Meas. Tech.* 2011, vol. 4, pp. 131–141.

14. Chan M.A. Arctic Cloud Characteristics as Derived from MODIS, CALIPSO, and CloudSat. *Journal of Climate.* 2013, vol. 26, pp. 3285–3306.

15. Gustokashin P.E., Kataev M.Yu. *Programmnoe obespechenie chteniya dannyh MODIS (produkt MOD04) i CALIPSO* [MODIS data reading software (product MOD04) and CALIPSO]. XVI Intern. scientific-practical conf. Moscow, MTSNO. 2018, vol. 16, no. 6, pp. 6–10.

16. Ivlev L.S., Dovgalyuk Yu.A. *Fizika atmosferynykh aërozol'nykh sistem*. [Physics of atmospheric aerosol systems]. St. Petersburg, Institute of Chemistry St. Petersburg State University, 1999, 194 p.

Pavel E. Gustokashin

Undergraduate Student
Department Automated Control Systems (ACS)
Tomsk State University of Control Systems
and Radio Electronics (TUSUR)
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: diwixis@mail.ru

Mikhail Yu. Kataev

Doctor of Engineering, Professor
Department Automated Control Systems (ACS)
Tomsk State University of Control Systems
and Radio Electronics (TUSUR)
Professor at Yurga Institute of Technology, Branch
of the National Research Tomsk Polytechnic University
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru

УДК 528.72 : 004.93

М.Ю. Катаев, К.С. Ёлгин, И.Б. Сорокин

Методы технического зрения для картирования состояния сельскохозяйственных полей

Автоматизированная визуальная оценка состояния земли и растений, увядания и поражения вредителями листьев, показателей роста растений с использованием технического зрения (ТЗ) может использоваться в качестве основы в умном (точном) сельском хозяйстве (СХ). В настоящей статье рассматривается краткий обзор литературы по применению технического зрения для анализа состояния сельскохозяйственных полей и растущих на них растений. Внедрение систем ТЗ в реальную производственную сельскохозяйственную практику для прецизионных измерений связано с разработкой сложных математических подходов, которые должны быть устойчивы к разнообразным техническим и погодным изменениям. Необходимо преодолеть изменения изображения, вызванного атмосферными условиями и суточной и сезонной вариацией солнечного света. Предлагается подход, в основе которого лежит RGB-изображение, полученное с помощью типовой цифровой камеры. Приводятся результаты по использованию систем ТЗ при решении отдельных задач СХ.

Ключевые слова: техническое зрение, математические методы изображения, сельское хозяйство, классификация изображений, беспилотный летательный аппарат.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-75-80

В настоящее время не является секретом, что современные цифровые технологии (ЦТ) редко применяются в сельском хозяйстве (СХ) России. Мировой опыт показывает, что внедрение ЦТ в сельское хозяйство позволит обеспечить рост производительности труда, повысить качество продукции, снизить расходы и др. Современные телекоммуникационные, компьютерные и измерительные технологии дают возможность разрабатывать и внедрять автоматизированные технологические и компьютерные системы, позволяющие связывать сельскохозяйственных производителей, работников компьютерной сферы и управление в единый процесс. Для внедрения ЦТ в практику СХ в России разработано множество нормативных документов и программ, например: программа «Цифровая экономика Российской Федерации» [<https://data-economy.ru>], «FoodNet» [<http://www.nti2035.ru/markets/foodnet>], «Цифровое сельское хозяйство» [<https://iotas.ru/projects/agriculture>] и др.

В рамках аграрной политики государство видит рациональное использование земель сельскохозяйственного назначения с учетом обеспечения плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения, развитие растениеводства и др. Развитие растениеводства связано с проблемой контроля заброшенных земель и нецелевого использования пахотных СХ земель, перевод их под дачное или жилищное строительство, под промышленные площадки и др. Другой важной задачей является контроль за состоянием растений от момента их посадки до вызревания и уборки. Этот сегмент исследований, в основе которых находятся ЦТ, еще слабо проник в СХ производство. Контроль значительных по размеру и распределенных по пространству участков СХ земель является трудным и слабо реализуемым в современных хозяйствах классическими методами. Здесь проблемой является невозможность исследовать характеристики почвы и растений на частой

пространственной и временной сетках. Получаемая классическими методами информация является редкой по времени и пространству и более опирается на опыт агрономических работников.

Современные агрономические отчеты содержат лишь небольшие по объему данные измерений, что является проблемой при формировании статистики по изменению параметров в течение сезона и проведению аналитики изменения измеряемых параметров в зависимости от различных условий (например, метеорологии и др.). Указанные аспекты тем не менее позволяют решать производственные задачи, однако усложняют задачу получения детальной и своевременной информации о состоянии растений и использовании земель сельскохозяйственного назначения.

Решение перечисленных выше проблем возможно с помощью современной мониторинговой базы, основанной на использовании данных спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и информации, полученной с борта беспилотных летательных устройств (БПЛА). Полученная таким образом информация является уникальной в том плане, что обладает высоким временным и пространственным разрешением и информативна (наличие многоспектральной информации). Отметим, что преимущества ДЗЗ в СХ производстве широко известны, но информация о возможности применения БПЛА еще только начинает свое развитие. Получаемая информация с борта БПЛА обеспечивает возможность получения актуальной информации с высокой периодичностью (несколько раз в день), возможности охватывать измерениями большие территории с высоким пространственным разрешением (до нескольких сантиметров), получать данные в единообразном виде (изображения в RGB или многоспектральном виде).

Современные цифровые камеры, устанавливаемые на БПЛА, обладают техническими характери-

стиками, позволяющими решать множество практических задач сельскохозяйственного производства. В данной работе приводится описание программного обеспечения, необходимого для решения задачи определения состояния сельскохозяйственных культур на больших площадях. Получение этой информации возможно благодаря набору отдельных изображений СХ территории с нескольких спектральных каналов цифровой RGB-камеры или с дополнительными спектральными каналами (ближней ИК- или ИК-области спектра). Наличие этой информации позволяет определять характеристики растений из расчета различных индексов (вегетационных, почвенных и др.), а также текстурного или цветового анализа.

Проведение измерений в разные периоды времени и получение разновременных данных позволяет определять динамику изменений характеристик сельскохозяйственных культур, что прямо связано с выполненными агротехническими работами. Такие исследования четко позволяют определять площади СХ территорий, где наблюдается отклонение от средних значений, например, ввиду деградации параметров почвы, близкого к поверхности горизонта воды и др. Наличие изображений полей позволяет ставить задачу о получении картографической информации состояния СХ территорий, учитывая тот факт, что на БПЛА можно поставить высокоточные приборы географической привязки. Такая геопространственная информация позволяет решать задачи совмещения изображений по пространству и времени, а также встраивать изображения в геоинформационные системы (ГИС).

Наличие цветочных каналов RGB позволяет рассматривать цифровую камеру, как спектральное устройство, которое дает возможность делать расчеты индексов (Greenness), связанных с нормализованным разностным индексом растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Разница лишь в том, что для расчета NDVI требуется наличие спектральной информации в области 0,7–0,9 мкм, а красный канал цифровой камеры расположен в области 0,6–0,7 мкм. Тем не менее, подбирая цифровые камеры с необходимыми спектральными каналами, возможно получать достоверную информацию о состоянии сельскохозяйственных культур. Использование результатов расчета индекса Greenness в мониторинговых задачах оценки динамики характеристик позволяет получить пространственно-временные карты.

Наличие априорной информации о характеристиках почвы и метеорологической информации позволяет строить математические модели изменения состояния СХ культур (амплитуду и скорость роста в различные периоды вегетации). Наличие такой информации позволяет заранее прогнозировать возможный урожай, тип уборки урожая (учитывая время и территорию). Отметим, что периодичность съемки является важным параметром, определяющим точность прогноза и решения задач, контроля выполненных агротехнических работ, мониторинга уборки урожая и др.

Точное сельское хозяйство

Точное сельское хозяйство (ТСХ) начало свое существование в 1980-х годах с применения датчиков контроля состояния СХ земель и состояния воздуха. Развитие ТСХ проходило быстро, учитывая появление доступной аэрокосмической информации, доступных и миниатюрных датчиков и рост их надежности. Начиная с 1990-х гг. в область интересов ТСХ, помимо почвы, стали попадать растения. Управление качеством почвы требовало создания не отдельных точек, а сети приборов, данные которых регулярно собирались и обрабатывались. Начиная с 2000-х годов все большее внимание стало уделяться мониторингу с помощью наземных датчиков во взаимосвязи с аэрокосмической информацией. Точность и информативность спутниковых изображений стали больше, что позволило оценивать характеристики почвы и растений на высоком временном и пространственном разрешении. Однако появление большого количества данных привело к необходимости обеспечивать хранение данных и разрабатывать более совершенные методы и требования к обработке. Начиная с 2010 г. в практику ТСХ стали внедряться беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

Информация мониторинга СХ полей

Большой объем данных, который собирается в измерениях при анализе территории СХ полей, дает более точную информацию после обработки и анализа, что приводит к улучшению качества и количества урожая, повышению производительности труда и минимизации вреда окружающей среде. Современные информационные технологии позволили перейти от рассмотрения пространственных данных к анализу пространственно-временных данных. Для обработки и анализа собираемых данных, необходимо разрабатывать соответствующие информационные системы (ИС), которые должны включать несколько этапов управления информацией, обработку и анализ данных, обеспечивать получение данных и их хранение, а также визуализацию в текстовом, табличном и графическом виде. Основой данных таких ИС являются спутниковые многоспектральные изображения, данные БПЛА (изображения и датчики), метеорологические и агрохимические данные. Датчики и цифровые камеры могут быть установлены на любых платформах, которые могут нести их, например: тракторы, комбайны, стационарное оборудование и др.

Элементы технического зрения (устройства и программное обеспечение), обладая невысокой стоимостью и высокой эффективностью (надежностью) начинают применяться сельскохозяйственными производителями. Получаемые изображения с борта БПЛА, подкрепленные сопутствующими данными (датчики, расположенные на полях, метеорология и агрохимия), являются необходимой и достаточной информацией для точного и своевременного принятия решений. Знание истории изменения данных, в привязке к конкретному полю позволяет с помощью использования различных математических подходов

к обработке и анализу поступающей информации получать прогноз состояния СХ растений в зависимости от природных факторов.

Самый простой вариант использования системы ТЗ связан с применением цветной цифровой камеры и набора алгоритмов обработки и анализа изображений. Методы обработки могут быть оптимизированы для определения и контроля определенного растения, в условиях изменения окружающей среды (например, освещения и метеорологических параметров). Возможно применение и сложных измерительных устройств, таких как гиперспектральные спектрометры и лазеры, что дает возможность получать новые виды параметров (например, высота растения) и более точное определение параметров состояния СХ растений.

Описание программной системы

Задача измерений является центральной, однако без правильно организованной обработки и предоставления пользователю информации решения могут быть неточными. Поэтому разработка соответствующего программного обеспечения является важной задачей при организации системы мониторинга СХ территорий. Разработка автоматизированных информационных систем (АИС) сбора информации с борта БПЛА, обработки, анализа и визуализации должна базироваться на современных программно-алгоритмических технологиях. В основе АИС должны использоваться ГИС, так как получаемая информация связана с распределенными участками СХ территории. На рис. 1 представлена структура разрабатываемой в коллективе программы, которая обеспечивает получение изображений с борта БПЛА, хранение, обработку, анализ и визуализацию.

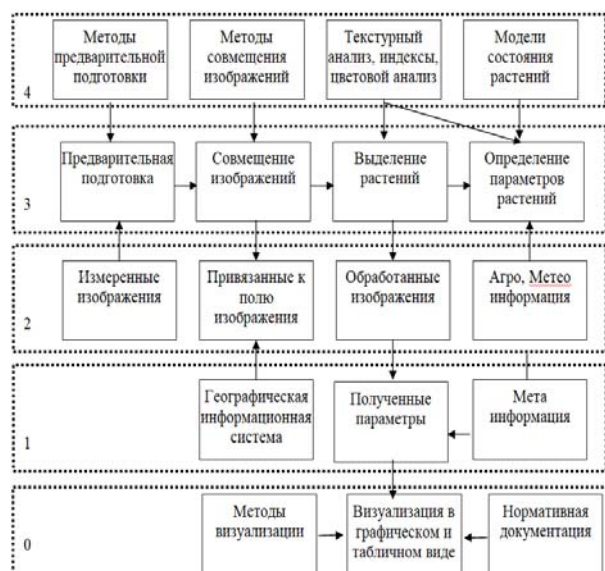


Рис. 1. Структура программы обработки изображений БПЛА

Основные элементы программы связаны с обработкой получаемых изображений, к которой относится предварительная и тематическая. На стадии предварительной обработки происходит совмещение набора изображений, полученных в ходе полета

БПЛА, в одно целое и привязка его к географическим опорным точкам. После этого поле разбивается на сектора (размер сектора зависит от высоты полета БПЛА и требований пользователя), каждый из которых обрабатывается независимо. На этой стадии обработки, каждое изображение приводится к единой яркостной величине первого измеренного изображения с помощью подхода «серый мир».

На этапе тематической обработки происходит выделение растений на изображении и расчет разнообразных индексов. Подобные расчеты проводятся для каждой серии измерений для каждого из полей. Далее происходит анализ накопленной информации и определение вегетационного цикла растений для каждого растения или сектора (по выбору пользователя). Выделение растения на изображении позволяет избавиться от влияния фона, который может быть сложным. Для этого происходит расчет индексов, на основе RGB-каналов и анализ индексов позволяет однозначно отделить растения от фона. Анализ полученной информации связан с расчетом площади растения, определением формы и состояния растения по его цветовым характеристикам (например, наличие желтого, коричневого цвета) и величине индекса.

Вегетационные индексы

Вегетационные индексы позволяют в количественной мере оценить состояние растения на момент измерения из сравнения значений спектральных каналов RGB. Известно, что в сине-зеленой области спектра растения имеют низкую отражательную способность, которая значительно вырастает в красной и ближней инфракрасной области спектра. Соответственно, сравнивая значения каналов RGB в пикселях, соответствующих растению, можно детектировать состояние растения. Приведем несколько вегетационных индексов, которые рассчитываются на основе каналов RGB: GCC – Green Chromatic Coordinate, RCC – Red Chromatic Coordinate, BCC – Blue Chromatic Coordinate, ExG – Excess Green, ExR – Excess Red и NDI – Normalized Difference Index.

Вычисление индексов GCC, BCC и RCC проводится по формулам:

$$GCC = \text{Green} / (\text{Blue} + \text{Green} + \text{Red}), \quad (1)$$

$$BCC = \text{Blue} / (\text{Blue} + \text{Green} + \text{Red}), \quad (2)$$

$$RCC = \text{Red} / (\text{Blue} + \text{Green} + \text{Red}), \quad (3)$$

$$\text{ExG} = 2 \cdot \text{GCC} - \text{RCC} - \text{BCC}, \quad (4)$$

$$\text{ExR} = 1.4 \cdot \text{RCC} - \text{GCC}, \quad (5)$$

$$\text{NDI} = (\text{Red} - \text{Green}) / (\text{Red} + \text{Green}), \quad (6)$$

где Red, Blue, Green – значения каналов для каждого пикселя изображения.

Растения на изображении выделялись с помощью эмпирически подбираемых порогов, для каждого из индексов (1–6). Далее проводилось сравнение индексов и среди всех результатов выбирался индекс со средними характеристиками.

Полученные результаты

Для проверки работоспособности предлагаемых алгоритмов авторами был проведен модельный эксперимент, связанный с выращиванием растений в специально подготовленных комнатных условиях. Наблюдение за ростом растения (пшеница) прово-

дилось ежедневно в полдень в течение двух месяцев. За это время растение прошло все стадии своего вегетационного цикла от созревания, до увядания (рис. 2, а, в). Полученные ежедневные изображения были обработаны на разработанном программном обеспечении согласно структуре, приведенной на рис. 1. Программа разрабатывалась на языке программирования C# с применением библиотек технического зрения. Результаты обработки изображений, связанные с выделением растений, приведены на рис. 2, б, г. Из рис. 2, а–г видно, что растения хорошо выделяются на изображениях.

Для использования полученных результатов на практике сельского хозяйства нами выполнялись расчеты числа пикселей, соответствующих растению. Результаты расчетов для проведенного эксперимента приведены на рис. 3. Видно, что растение на стадии роста увеличивает площадь листьев, затем наступает насыщение (площадь листьев не меняется) и далее происходит увядание растения, при котором площадь листьев сокращается.

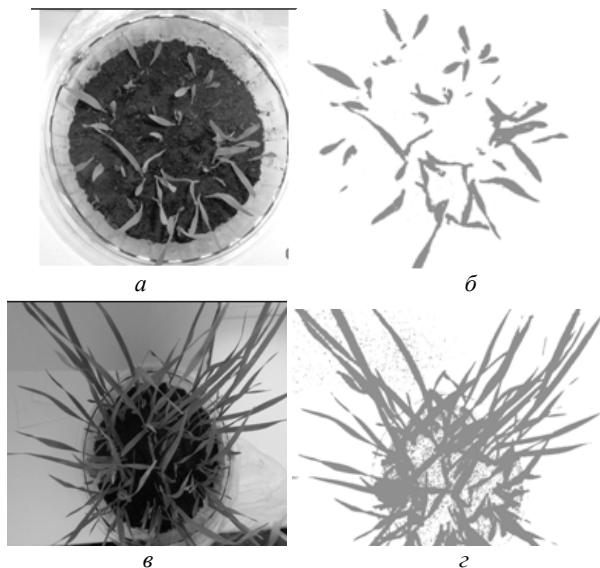


Рис. 2. Выделение растений на изображении в различные промежутки времени: а, в – исходные изображения и б, г – выделенные растения

Параллельно с расчетом числа пикселей, соответствующих растению, нами проводился учет одного из вегетационных индексов ExG (рис. 4). Из рисунка видно, что кривая вегетационного цикла имеет сложную структуру, которая связана с метеорологическими условиями (открытое окно, воздействие солнца и др.). Это говорит о чувствительности индексов к воздействию освещения и метеорологическим параметрам, что непосредственно может быть использовано на практике. Возможно проведение серии калибровочных тестовых измерений (получение изображений) с одновременной фиксацией различных метеорологических условий. На основе полученных измерений можно получить функции изменения вегетационных индексов в зависимости от различных условий роста растений.

Число пикселей

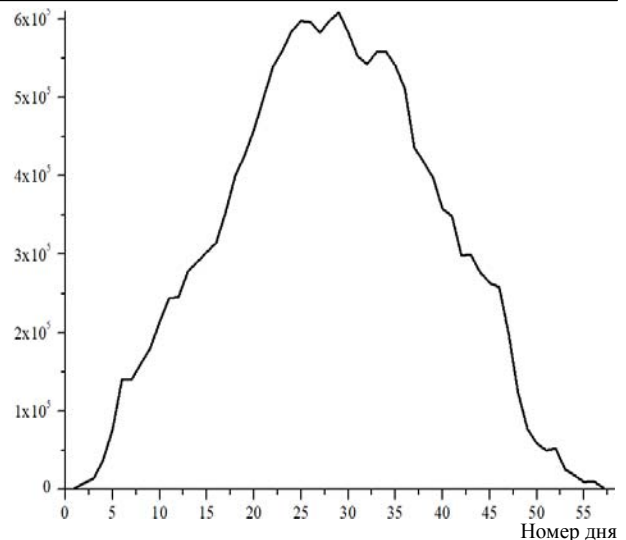


Рис. 3. Вегетационный цикл растения, определенный по числу пикселей, соответствующих растению

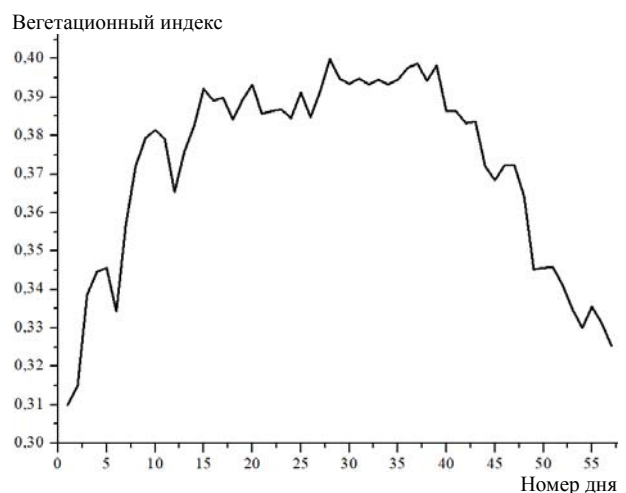


Рис. 4. Вегетационный цикл растения, определенный по индексу ExG

Данная работа выполняется в центре космического мониторинга Земли ТУСУРа, в рамках проекта РФФИ №16-05-00901 «Механизмы, закономерности и особенности формирования стратосферного и мезосферного аэрозоля над территорией Сибири и Дальнего Востока» и государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 8.8184.2017/8.9 «Методология создания систем энергогенерирующих и энергопреобразующих устройств для наземных и бортовых комплексов наземного, космического и подводного базирования».

Заключение

В статье кратко приведены исторические аспекты развития точного земледелия и появления в практике сельского хозяйства БПЛА. Показаны основные элементы технического зрения, необходимые для анализа состояния СХ растений. Говорится о том, что для верификации получаемых данных с борта БПЛА необходимо учитывать метеорологические условия и изменения освещенности солнечным светом. Приведена структура программного обеспечения, необходимая для полного решения поставлен-

ной задачи оценки состояния растений. Представлены результаты обработки данных измерений тестового выращивания растений в комнатных условиях. Показано, что предлагаемый подход, в основе которого лежит RGB-изображение, позволяет получить информацию о состоянии растения на всем временном отрезке вегетационного цикла. Предлагается возможным предложить данный подход для практического использования в реальных условиях сельскохозяйственных полей.

Литература

1. Тихонова А.В. Государственное регулирование основных факторов производства в АПК / А.В. Тихонова. – М.: ИНФРАМ, 2017. – 122 с.
2. Кочубей С.М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики / С.М. Кочубей, Н.И. Кобец, Т.М. Шадшина. – Киев: Наукова думка, 1990. – 136 с.
3. Антонов В.Н. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ / В.Н. Антонов, Л.А. Сладких // Геоматика. – 2009. – № 4. – С. 50–53.
4. Кондратьев К.Я. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности / К.Я. Кондратьев, П.П. Федченко. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 216 с.
5. Войнов О.А. Мониторинг состояния агроценозов аэрокосмическими методами. – К.: ИТГИП, 2005. – 392 с.
6. Катаев М.Ю. Возможности космического мониторинга для целей сельского хозяйства Томской области / М.Ю. Катаев, А.А. Скугарев, И.Б. Сорокин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 186–190.
7. Анпилов В.Р. Рынок дистанционного зондирования Земли: индустрия и сервисы на рынке ДЗЗ. – М.: ВИСАТ-ТЕЛ. – 2015. – 58 с.
8. Долгирев А.В. Современные методы мониторинга сельскохозяйственных угодий / А.В. Долгирев, Е.Н. Калашникова // Инновационные технологии и технические средства для АПК. – Воронеж, 2015. – С. 83–88.
9. Антипов И.Т. Об использовании цифровых средне- и малоформатных камер для аэрофотосъемки / И.Т. Антипов, Е.А. Кобзева // Геодезия и картография. – 2013. – № 11. – С. 29–34.
10. Кравцова В.И. Возможности использования многозональных снимков в исследовании почвенного покрова / В.И. Кравцова, С.А. Николаева // Космическая съемка и тематическое картографирование. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. – С. 148–154.
11. Пузаченко М.Ю. Многомерный анализ почвенного покрова на основе полевой и дистанционной информации // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. – М., 2012. – С. 252–269.
12. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 98–102.
13. Черепанов А.С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 28–32.
14. Труфляк Е.В. Точное земледелие / Е.В. Труфляк, Е.И. Трубилин. – СПб.: Лань, 2017. – 376 с.
15. Прэрт У. Цифровая обработка изображений: в 2 кн. – М.: Мир, 1982. – Кн. 1. – 312 с., кн. 2. – 480 с.
16. Гарсия Г.Б. Обработка изображений с помощью OpenCV / Г.Б. Гарсия, О.Д. Суарес. – М.: ДМК-Пресс, 2016. – 210 с.
17. Ide R. Use of digital cameras for phenological observations / R. Ide, H. Oguma // Ecological Informatics. – 2010. – No. 5. – P. 339–347.
18. Woebbecke D.M. Color Indexes for Weed Identification under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions / D.M. Woebbecke, G.E. Meyer, K. Vonbargen, D.A. Mortensen // Trans. ASABE. – 1995. – Vol. 38. – P. 259–269.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), профессор Юргинского технологического института, ф-ла Национального исследовательского Томского политехнического университета Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7 (960) 975-27-85
Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Ёлгин Кирилл Станиславович

Магистрант ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: kirill1996200922@yugs.ru

Сорокин Игорь Борисович

Д-р с.-х. наук, директор
ФГБУ «Станция агрохимической службы «Томская»
Беринга ул., д. 12а, г. Томск, Россия, 634063
Тел.: +7 (382-2) 90-49-45
Эл. почта: sastom@mail.ru

Kataev M.Yu., Elgin K.S., Sorokin I.B.

Computer vision methods for mapping the state of agricultural fields

Automated visual assessment of the state of the earth and plants, withering and damage by pests of leaves, plant growth indicators, using computer vision (CV), can be used as a basis in intelligent (accurate) agriculture (AC). This article discusses a brief review of the literature on the application of technical vision to analyze the state of agricultural fields and the plants growing on them. The introduction of CV systems into real production agricultural practice, for precision measurements, is associated with the development of complex mathematical approaches that must be resistant to various technical and weather changes. It is necessary to overcome image changes caused by atmospheric conditions and daily and seasonal variation of sunlight. An approach based on the RGB image obtained using a typical digital camera is proposed. The results of using CV systems in solving individual problems of AC.

Keywords: computer vision, mathematical methods, images, agriculture, image classification, unmanned aerial vehicle (UAV).

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-753-80

References

1. Tikhonova A.V. State regulation of the main factors of production in the agro-industrial sector: monograph. M., INFRAM, 2017, 122 p. (in Russ.).

2. Kochubey S.M., Kobets N.I., Shadshina T.M. *Spectral properties of plants as a basis for remote diagnostics methods*. Kiev. Naukova Dumka, 1990, 136 p. (in Russ.).
3. Antonov V.N., Sweet L.A. Monitoring sostoyaniya posevov i prognozirovanie urozhajnosti yarovoj pshenicy po dannym DZZ. *Geomatics*, 2009, № 4, pp. 50–53. (in Russ.).
4. Kondratyev K.Ya., Fedchenko P.P. *Spectral reflectivity and vegetation recognition*. L., Hydrometeoizdat. 1982, 216 p. (in Russ.).
5. Voinov O.A., Warriors O.A. *Monitoring of the state of agroecosystems by aerospace methods*. K. ITGIP, 2005, 392 p. (in Russ.).
6. Kataev M.Yu., Skugarev A.A., Sorokin I.B. Vozmozhnosti kosmicheskogo monitoringa dlya celej sel'skogo hozjajstva Tomskoj oblasti [перевод]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 186–190 (in Russ.).
7. Anpilgov V.R. *Earth remote sensing market: industry and services in the remote sensing market*. M., VISAT-TEL. 2015, 58 p. (in Russ.).
8. Dolgirev A.V., Kalashnikova E.N. *Sovremennye metody monitoringa sel'skohozyajstvennyh ugodij*, Voronezh, 2015, pp. 83–88 (in Russ.).
9. Antipov, I.T., Kobzeva E.A. Ob ispol'zovanii cifrovyyh sredne- i maloformatnyh kamer dlya aehrofotos"emki. *Geodesy and Cartography*, 2013, no. 11, pp. 29–34 (in Russ.).
10. Kravtsova V.I., Nikolayev S.A. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya mnogoazonal'nyh snimkov v issledovanii pochvennogo pokrova*. M., Publishing House of Moscow. un-that. 1979, pp. 148–154 (in Russ.).
11. Puzachenko M.Yu. *Mnogomernyj analiz pochvennogo pokrova na osnove polevoj i distancionnoj informacii*. M., 2012, pp. 252–269 (in Russ.).
12. Cherepanov A.S. *Vegetacionnye indeksy*. *Geomatics*, 2011, no. 2, pp. 98–102 (in Russ.).
13. Cherepanov A.S., Druzhinin E.G. *Spektral'nye svojstva rastitel'nosti i vegetacionnye indeksy*. *Geomatics*, 2009, No. 3, pp. 28–32 (in Russ.).
14. Truflyak E.V., Trubilin E.I. *Tochnoe zemledelie*. SPb, Lan publishing house, 2017, 376 p.
15. Pratt U. *Digital image processing*. In 2 books. M. Mir, 1982, t. 1, 312 p., t. 2, 480 p.
16. Garcia G.B., Suarez O.D. *Image processing using OpenCV*. – M.: DMK Press, 2016, 210 p.
17. Ide R., Oguma H. Ossee et al., H. Oguma *Ecological Informatics*. 2010, no. 5, pp. 339–347.
18. Woebbecke D.M., Meyer G.E., Vonbargen K., Mortensen D.A. *Soil, Residue, and Lighting Conditions*. *Trans. ASABE*, 1995, vol. 38, pp. 259–269.
-

Kataev Mikhail Yurievich

Doctor of Engineering, Professor
Department Automated Control Systems (ACS)
Tomsk State University of Control Systems
and Radio Electronics (TUSUR)
Professor at Yurga Technological Institute,
Branch of the national research Tomsk Polytechnic University
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru

Yolgin Kirill Stanislavovich

Undergraduate Student
Department Automated Control Systems (ACS)
Tomsk State University of Control Systems
and Radio Electronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: kirill1996200922@yugs.ru

Sorokin Igor Borisovich

Doctor of Agricultural Sciences,
Director of FSBI «Agrochemical Service Station», Tomsk
12a, Bering st., Tomsk, Russia, 634063
Phone: +7 (382-2) 90-49-45
Email: sastom@mail.ru

УДК 004.891

М.П. Силич, С.В. Аксенов

Генерация наименований нечетких кластеров в пространстве разнородных признаков для зонирования территориальных объектов по внешним условиям

Предлагается метод генерации наименований на естественном языке для групп территориальных объектов с приблизительно похожими внешними условиями. Группы формируются путем нечеткой кластеризации значений неоднородных индикаторов, характеризующих внешний фактор. Пространство значений индикаторов разбивается на зоны, сопоставляемые базовым термам, заданным для каждого индикатора. Наименование того или иного кластера генерируется по эвристическим правилам в зависимости от его расположения в пространстве индикаторов путем комбинирования базовых термов и связей.

Ключевые слова: нечеткая кластеризация, наименования кластеров, генерирование термов, зонирование территорий.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-81-86

Сравнительный анализ уровня развития некоторой сферы общественной жизни территориальных объектов (субъектов РФ, муниципальных образований, поселений, отдельных зданий, сооружений) позволяет классифицировать территории по уровням либо расставить их по рейтингу. Как правило, используется индикативный подход, при котором оценки (в виде рангов, баллов или лингвистических значений) выводятся на основе значений индикаторов для сравниваемых территориальных объектов (ТО) [1, 2]. Полученные оценки являются основой для принятия решений по исправлению ситуации в проблемных регионах [3, 4].

Однако неоднородность природно-климатических, социально-экономических, инфраструктурных и других внешних факторов снижает адекватность оценок, поскольку регионы изначально находятся в различных условиях [5, 6]. Зонирование территорий по внешним факторам, влияющим на исследуемую сферу, дает возможность сравнивать ТО в рамках групп с приблизительно похожими внешними условиями. Зонирование может осуществляться различными способами. Например, в [7] для зонирования территорий по признакам, влияющим на энергосбережение, предлагается использовать метод группировки на основе средневзвешенных показателей по множеству признаков или поэтапной группировки по степени близости значений признаков.

Другой подход состоит в применении методов нечеткой кластеризации, например, нечетких с-средних (FCM) или Густаффсона–Кесселя (GK) [8, 9]. Они позволяют учитывать неоднозначность в определении границ кластеров. Немаловажно, что методы кластеризации не используют субъективные знания эксперта и выполняются автоматически. Пользователю предъявляются результаты в виде степеней принадлежности объектов кластеризации нечетким кластерам. В качестве идентификаторов кластеров, как правило, используются порядковые номера. Однако желательно, чтобы наименования кластеров несли смысловую нагрузку и были выражены в тер-

минах естественного языка. Это облегчает пользователю интерпретацию результатов зонирования территорий на семантическом уровне. Например, наименованиями зон, полученных в результате кластеризации регионов по таким индикаторам, характеризующим климатические условия, как влажность воздуха и средняя годовая температура воздуха, могут быть «сухой холодный климат», «влажный теплый климат», «сухой умеренный климат» и т.д.

Основной сложностью является то, что заранее не известно каково будет расположение кластеров. Их количество также может варьироваться в ходе итерационного поиска наилучшего разбиения, и сколько в итоге будет получено кластеров – не известно. Даже после получения результатов кластеризации подбор наименований может вызывать затруднения, особенно в случае множества индикаторов, поскольку визуализировать кластеры в многомерном пространстве не всегда возможно [10–12].

Задача подбора наименований кластеров может рассматриваться как задача формирования термов лингвистической переменной [13]. Кластеры при этом представляют собой дискретно заданные многомерные функции принадлежности. В большинстве работ, посвященных вопросам генерации значений лингвистической переменной (например, в [14–16]), предполагается, что функции принадлежности термов являются одномерными и задаются аналитически или графически. В [17] авторами данной статьи был предложен метод генерации наименований кластеров, основная идея которого состоит в сравнении границ «идеальных» кластеров, сопоставленных термам базового терм-множества, и реальных кластеров, полученных в результате кластеризации.

Однако данный метод применим только в случае использования однородных признаков кластеризации, т.к. интерпретация значений индикаторов осуществляется на основе одного общего набора базовых термов, отражающих уровень развития оцениваемого фактора (например, «низкий», «средний», «высокий»). Оценки по всем индикаторам при

этом должны быть согласованы. В случае же зонирования территориальных объектов по внешним условиям очень часто используются разнородные признаки, не коррелирующие друг с другом. Еще один недостаток существующего метода состоит в том, что хотя и используется алгоритм нечеткой кластеризации, степени принадлежности объектов кластерам не учитываются, т.е. от нечетких кластеров осуществляется переход к четким. Поэтому возникла потребность в разработке нового метода автоматической генерации наименований нечетких кластеров, устраняющего указанные выше недостатки и предназначенного для оценки внешних факторов при зонировании территориальных объектов по множеству разнородных индикаторов.

Метод генерации наименований кластеров

Имеется множество территориальных объектов $O = \{o_k\}$, которые необходимо распределить по группам, содержащим объекты с приблизительно одинаковым состоянием некоторого внешнего фактора. Состояние фактора оценивается по множеству индикаторов p_j – измеримых показателей, выступающих в роли признаков кластеризации. Например, для фактора, характеризующего погодные условия в некотором заданном году, индикаторами могут быть такие показатели, как «среднегодовая температура воздуха», «продолжительность отопительного периода», «среднегодовая влажность воздуха», «среднегодовая скорость ветра» и др. Каждый объект o_k характеризуется своим набором значений индикаторов. Это могут быть данные статистики или синтетические показатели, вычисленные на основе данных статистики.

Нечеткая кластеризация позволяет определить нечеткое покрытие: $\mathfrak{Z}(O) = \{O_l | O_l \subseteq O, l = \overline{1, L}\}$, которое задается матрицей $\|\mu_{O_l}(o_k)\|$ значений функций принадлежности объектов $o_k \in O$ нечетким кластерам O_l .

Кластеризацию территориальных образований предлагается выполнять с помощью алгоритма Густафсона–Кесселя [9]. Он имеет преимущества над наиболее популярным методом нечеткой кластеризации FCM, так как позволяет находить нечеткие кластеры гиперэллипсоидной формы, более точно отражающие распределение объектов по сравнению с кластерами в форме гиперсфер, выделяемых FCM.

Наименование кластера формируется в соответствии с шаблоном, задаваемым пользователем. Шаблон включает в себя произвольный текст и совокупности базовых термов для каждого индикатора. Базовые термы позволяют описать типовые состояния внешнего фактора (той его составляющей, которая характеризуется соответствующим индикатором) на качественном уровне. Например, для фактора «климат», характеризуемого индикаторами «влажность воздуха» и «средняя температура воздуха», шаблон может быть таким: «< сухой, влажный > < холодный, умеренный, теплый > климат».

Базовые термы перечисляются в шаблоне в порядке увеличения значений индикатора: первым указывается терм, соответствующий области низких значений, последним – терм, соответствующий области высоких значений.

Чтобы сгенерировать наименование T_l кластера O_l , необходимо определить множество термов T_l^j по каждому из индикаторов p_j и подставить их в шаблон. Терм T_l^j по отдельному индикатору может либо совпадать с одним из базовых термов, либо быть составным, сгенерированным на основе базовых термов с использованием различных связей.

Обозначим множество базовых термов для индикатора p_j через $\{B_m^j\}$. Термы ранжированы в порядке возрастания свойства, измеряемого индикатором: $B_1^j < B_2^j < \dots < B_M^j$. Общее количество базовых термов M не должно быть большим. В большинстве случаев целесообразно задать $M = 3$.

Каждому базовому терму B_m^j сопоставляется зона $[a_m^j, c_m^j]$ – интервал значений индикатора. Весь диапазон значений индикатора от минимального до максимального (по всем оцениваемым объектам) разбивается на M интервалов. Причем границы интервалов могут перекрываться. Для двух соседних термов B_m^j и B_{m+1}^j , имеющих соответственно ранги m и $m+1$, границы зон должны удовлетворять следующим условиям:

$$a_m^j < a_{m+1}^j, c_m^j < c_{m+1}^j, a_{m+1}^j \leq c_m^j,$$

где a_m^j, a_{m+1}^j – нижнее границы зон для термов B_m^j и B_{m+1}^j , c_m^j, c_{m+1}^j – верхние границы зон для соответствующих термов.

На рис. 1 двумерное пространство значений двух индикаторов разбито на зоны, соответствующие трем базовым термам по индикатору p_1 и трем базовым термам по индикатору p_2 .

Для удобства можно нормировать значения индикатора и использовать универсальную шкалу действительных чисел на интервале $[0; 1]$.

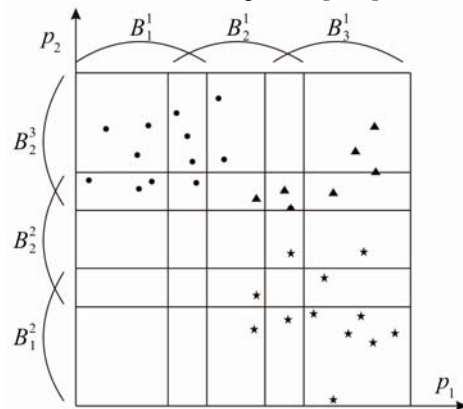


Рис. 1. Выделение зон, соответствующих базовым термам

Наименование кластера O_l по индикатору p_j определяется в зависимости от расположения его

проекции на ось индикатора – какие зоны и в какой мере охватывает данная проекция. Необходимо выделить в данном кластере подмножества O_m^j ($O_m^j \subseteq O_l$), соответствующие каждому из базовых термов B_m^j . Значения индикатора для объектов подмножества O_m^j находятся в границах зоны, соответствующей базовому терму

$$O_m^j = \{o_k \in O_l \mid a_m^j \leq x_k^j \leq c_m^j\},$$

где x_k^j – значение индикатора p_j для объекта o_k , a_m^j , c_m^j – соответственно нижняя и верхняя границы зоны для терма B_m^j .

Для каждого базового терма определим вес его зоны по формуле

$$z_m^j = \frac{\sum_{o_k \in O_m^j} \mu_{O_l}(o_k)}{\sum_{o_k \in O_l} \mu_{O_l}(o_k)}.$$

В зависимости от соотношения величин z_m^j ($m=1, M$) определяется терм T_l^j – наименование l -го кластера по j -му индикатору. В названии фигурируют те базовые термы, веса зон которых существенно больше весов остальных термов. Обозначим подмножество таких термов через $\{B_m^j\}^*$. Для любого $B_m^j \in \{B_m^j\}^*$ вес z_m^j его зоны либо является максимальным, либо отличается от максимального на некоторую пороговую величину ε (например, 0,1): $z_{\max}^j - z_m^j \leq \varepsilon$, где z_{\max}^j – максимальный вес зоны ($z_{\max}^j = \max_m z_m^j$).

Рассмотрим рекомендации по генерации составного терма на основе базовых.

Если веса зон всех базовых термов, кроме одного, невелики ($|\{B_m^j\}^*| = 1$), то в качестве наименования кластера используется базовый терм $B_m^j \in \{B_m^j\}^*$, вес зоны которого максимален: $T_l^j = B_m^j$.

В ситуации, когда имеется несколько базовых термов $B_{m1}^j, B_{m2}^j, \dots \in \{B_m^j\}^*$, веса зон которых близки к максимальному весу, наименование терма формируется с помощью связки «или»:

$$T_l^j = \langle B_{m1}^j \text{ или } B_{m2}^j \text{ или } \dots \rangle.$$

Если при этом веса зон всех базовых термов приблизительно равны, т.е. $|\{B_m^j\}^*| = M$, то вместо комбинации термов со связкой «или» можно использовать терм «любое». Если же в подмножестве $\{B_m^j\}^*$ существенных термов попали все базовые термы, кроме одного ($|\{B_m^j\}^*| = M - 1$), то альтернативой является применение связки «не»:

$$T_l^j = \langle \text{не } B_{mi}^j \rangle, \text{ где } B_{mi}^j \notin \{B_m^j\}^*.$$

В случае, когда существенными были признаны веса зон двух соседних базовых термов B_m^j и B_{m+1}^j ,

можно выполнить более тонкий анализ, позволяющий при определенном условии заменить связку «или» в наименовании кластера на связку «между». Для этого зоны обоих термов делятся пополам: для B_m^j будут получены интервалы $[a_m^j, b_m^j]$ и $[b_m^j, c_m^j]$, для B_{m+1}^j – интервалы $[a_{m+1}^j, b_{m+1}^j]$ и $[b_{m+1}^j, c_{m+1}^j]$, где $b_m^j = a_m^j + (c_m^j - a_m^j)/2$, $b_{m+1}^j = a_{m+1}^j + (c_{m+1}^j - a_{m+1}^j)/2$.

Определяются веса полученных полузон. Если для базового терма B_m^j вес верхней полузоны $[b_m^j, c_m^j]$ существенно (больше, чем на пороговую величину ε) превышает вес нижней полузоны $[a_m^j, b_m^j]$, а для терма B_{m+1}^j вес нижней полузоны $[a_{m+1}^j, b_{m+1}^j]$ существенно превышает вес верхней полузоны $[b_{m+1}^j, c_{m+1}^j]$, то наименование терма формируется с помощью связки «между»:

$$T_l^j = \langle \text{между } B_{m1}^j \text{ и } B_{m+1}^j \rangle.$$

Окончательное наименование кластера определяется путем подстановки в шаблон сгенерированных термов для каждого из индикаторов.

Пример генерирования наименований кластеров

Рассмотрим в качестве примера формирование наименований кластеров субъектов РФ, выделенных по такому внешнему фактору, как «потребность в тепловой энергии», влияющему на сравнительную оценку регионов по уровню энергоэффективности в сфере теплопотребления. Это фактор, который наряду с климатическими условиями необходимо учитывать при интерпретации показателей уровня потребления тепловой энергии в регионе. Например, одно и то же значение удельного потребления тепловой энергии для субъекта РФ, в котором доля централизованного теплоснабжения невелика и в структуре отраслей преобладает сельское хозяйство, может быть оценено как «высокий уровень», а для субъекта, в котором высока доля централизованного теплоснабжения и в структуре отраслей преобладает обрабатывающая промышленность, – как «средний уровень» или даже «низкий уровень». Типологическая группировка территорий позволяет учесть различия во внешних условиях, т.к. сравнение регионов по уровню энергоэффективности выполняется в рамках групп с похожими условиями.

На роль признаков кластеризации были выбраны два индикатора: p_1 – «удельный вес общей площади жилья, оборудованной отоплением» и p_2 – «нормативная теплоэнергоемкость». Индикатор p_2 рассчитывается как сумма по всем отраслям произведений нормативного потребления тепловой энергии в отрасли на долю соответствующей отрасли в экономике субъекта РФ. В качестве норматива использовалось среднее по России потребление тепловой энергии в отрасли на 1 тыс. руб. валовой добавленной стоимости, полученной в данной отрасли. Источником данных явились сайты Федеральной службы государственной статистики [18, 19]. Значения индикаторов нормировались.

Кластеризация данных выполнялась с помощью алгоритма Густаффсона–Кесселя. Было выделено четыре нечетких кластера. Результаты кластеризации представлены на рис. 2.

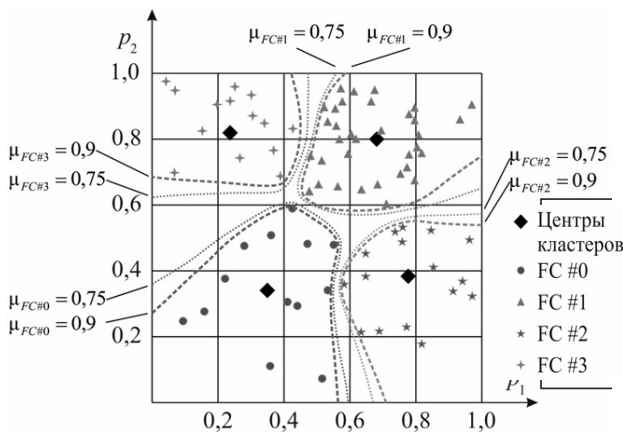


Рис. 2. Кластеры субъектов РФ по индикаторам «Удельный вес общей площади жилья, оборудованной отоплением» и «Нормативная теплоэнергоемкость»

Для наглядности на рисунке каждый субъект РФ отнесен лишь к одному кластеру – тому, степень принадлежности к которому максимальна.

Формирование наименований кластеров по фактору «потребность в тепловой энергии» осуществлялось на основе шаблона: «<низкая, средняя, высокая> в производственной сфере и <низкая, средняя, высокая> в жилищной сфере». Первая оценка в шаблоне определяется по индикатору p_1 , вторая – по индикатору p_2 . Таким образом, в качестве базовых для обоих индикаторов использовались термы: B_1^j – «низкая», B_2^j – «средняя», B_3^j – «высокая».

Границы зон базовых термов для обоих индикаторов были определены следующим образом: B_1^j – [0; 0,4], B_2^j – [0,3; 0,7], B_3^j – [0,6; 1]. Для зоны каждого базового терма обоих индикаторов были вычислены веса. Результаты приведены в таблице.

Веса зон базовых термов

Кластеры	Веса зон термов индикатора p_1			Веса зон термов индикатора p_2		
	B_1^1	B_2^1	B_3^1	B_1^2	B_2^2	B_3^2
Кластер FC#0	0,58	0,68	0,05	0,53	0,68	0,07
Кластер FC#1	0,03	0,58	0,56	0,01	0,23	0,93
Кластер FC#2	0,02	0,36	0,86	0,37	0,74	0,07
Кластер FC#3	0,82	0,35	0,01	0,02	0,12	0,93

Для кластера FC#0 в подмножество $\{B_m^1\}^*$ базовых термов, веса зон которых по индикатору p_1 были определены как существенные, попали термы B_1^1 («низкая») и B_2^1 («средняя») при условии, что $\varepsilon = 0,1$. Соответственно был сгенерирован терм T_0^1 = «низкая или средняя», который может быть заменен на терм «невысокая». Анализ весов полужон термов показал, что связка «между» в данном случае не может использоваться. Наименованием кластера по индикатору p_2 стал терм T_0^2 = «средняя», т.к. в

подмножество $\{B_m^2\}^*$ существенных базовых термов вошел только один терм – B_2^2 . В результате подстановки в шаблон было сгенерировано следующее название кластера FC#0, являющееся оценкой состояния фактора «потребность в тепловой энергии» для соответствующей группы субъектов РФ: «невысокая в производственной сфере и средняя в жилищной сфере».

Таким же образом были определены названия остальных кластеров: для FC#1 – «низкая в производственной сфере и высокая в жилищной сфере», для FC#2 – «высокая в производственной сфере и средняя в жилищной сфере», для FC#3 – «низкая в производственной сфере и высокая в жилищной сфере».

Заключение

Сравнительный анализ территорий, имеющих существенные различия во внешних условиях, требует дифференцированного подхода, заключающегося в выполнении сравнения в рамках групп территориальных объектов с приблизительно похожими условиями. Использование методов нечеткой кластеризации позволяет выделять группы объектов на основании значений множества разнообразных признаков без использования субъективных суждений экспертов. Для решения возникающей при этом проблемы подбора наименований кластеров, отражающих семантику результатов зонирования территорий, и был предложен описанный в данной работе метод. С его помощью наименования на естественном языке формируются автоматически путем комбинирования базовых термов и различных связей. Наименования подбираются в зависимости от расположения кластеров в пространстве значений индикаторов, причем с учетом «размытости» границ кластеров. Метод применим для случаев, когда в качестве признаков кластеризации выступают разнородные индикаторы, для семантической интерпретации значений которых используются разные наборы базовых термов.

Литература

1. Булетова Н.Е. Содержание оценки результатов социально-экономического развития регионов России с использованием методов системной диагностики / Н.Е. Булетова, О.Г. Евстифеева, Е.В. Кособокова // Экономика и предпринимательство. – 2017. – № 1. – С. 996–1004.
2. Крыжановская О.А. Структурно-динамические индикаторы эффективного управления развитием территорий: европейский опыт // Теория и практика сервиса. – 2017. – № 2. – С. 28–33.
3. Орехова Е.А. Пространственный анализ и оценка угроз безопасности социально-экономического развития малых и средних городов / Е.А. Орехова, А.В. Плякин // Вестник Волгоград. гос. ун-та. Сер. 3: Экономика, экология. – 2016. – № 37(4). – С. 65–81.
4. Development trends of the Russian regions / S.D. Valentey, A.R. Bakhtizin, Ye.V. Bukhvald, A.V. Kolchugina. // Экономика региона. – 2014. – № 39 (3). – С. 9–22.
5. Myzin A.L. The modeling of national wealth of the Russia's regions / A.L. Myzin, A.I. Tatarokin // Экономика региона. – 2013. – № 4. – С. 53–65.

6. Криворотов В.В. Научно-методические основы исследования экономической безопасности в системе устойчиво-безопасного социально-экономического развития территорий / В.В. Криворотов, А.В. Калина, С.Е. Ерыпалов // Вестник Урал. фед. ун-та. – 2014. – № 5. – С. 121–132.

7. Иванченко О.Г. Методические положения зонирования территории регионов по признакам энергосбережения / О.Г. Иванченко, Л.А. Голованова // Вестник ТОГУ. – 2008. – № 2 (9). – С. 57–68.

8. Fuzzy cluster analysis: method for classification, data analysis, and image recognition / F. Hoepfner, F. Klawonn, R. Kruse, T. Runkler. – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1999. – 300 p.

9. Silich V.A. An Approach to Speed-up the Density-based Clustering via Gustaffson-Kessel Fuzzy Algorithm / V.A. Silich, M.P. Silich, S.V. Axonov // Proceedings of 6th International Conference on Computer and Electrical Engineering (ICCEE 2013). – Paris: ETP Press, 2013. – PP. 167–172.

10. Sevilla-Villanueva B. A methodology to discover and understand complex patterns: Interpreted Integrative Multiview Clustering (I2MC) / B. Sevilla-Villanueva, K. Gibert, M. Sanchez-Marre // Pattern Recognition Letters. Pattern Recognition Techniques in Data Mining. – 2017. – Vol. 93. – P. 85–94.

11. Feyereisl J. STORM – A Novel Information Fusion and Cluster Interpretation Technique / J. Feyereisl, U. Aickelin // Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning (IDEAL 09), Lecture Notes in Computer Science 5788, Burgos, Spain. – 2009. – P. 208–218.

12. Cornforth D.J. Cluster evaluation, description, and interpretation for serious games: player profiling in Minecraft. / D.J. Cornforth, M.T.P. Adam // Serious Games Analytics: Methodologies for Performance Measurement, Assessment, and Improvement. – Springer, 2015. – P. 135–155.

13. De Carvalho F. Fuzzy clustering of interval-valued data with City-Block and Hausdorff distances / F. De Carvalho, E. Simões // Neurocomputing. – 2017. – Vol. 266. – P. 259–273.

14. Борсук С.П. Свойства модификаторов составных термов лингвистических переменных // Электроника та системи управління. – 2012. – № 3. – С. 152–157.

15. Румбешт В.В. Расширение аппарата теории нечетких множеств и лингвистической переменной для представления экспертных знаний // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер.: история. Политология. Экономика. Информатика. – 2012. – Т. 24, № 19-1. – С. 141–148.

16. Ефремов А.А. Новые операции над нечеткими числами и интервалами // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 1(27). – С. 95–99.

17. Метод генерирования наименований кластеров территориальных образований при оценке уровня их развития / М.П. Силич, Е.И. Грибков, В.А. Силич, С.В. Аксенов // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 11. – С. 34–40.

18. Единая межведомственная информационно-статистическая система [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.fedstat.ru/indicator/data.do>, свободный (дата обращения: 25.05.2017).

19. Официальный интернет-портал Федеральной службы государственной статистики [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gks.ru/>, свободный (дата обращения: 25.05.2017).

Силич Мария Петровна

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизации обработки информации (АОИ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-91
Эл. почта: mary.silich@yandex.ru

Аксёнов Сергей Владимирович

Канд. техн. наук, доцент инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР) Национального исследовательского Томского политехнического ун-та (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-61-30
Эл. почта: axonov@tpu.ru

Silich M.P., Axonov S.V.

Generation of names of fuzzy clusters in the space of heterogeneous features to zone territories by external conditions

The article proposes a method to generate names in a natural language for clusters of territories with approximately similar external conditions. The clusters are formed by fuzzy clustering of heterogeneous indicators representing external factors. The method divides the indicator value space into regions that are mapped to the basic terms defined for each indicator. The name of a particular cluster is generated by heuristic rules depending on its location in the indicator value space by combining the basic terms and connectors.

Keywords: fuzzy clustering, names of the clusters, generation of terms, zoning of territories.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-81-86

References

1. Buletova N.E., Evstifeeva O.G., Kosobokova E.V. Content assessment of the results of socio-economic development of the regions of Russia using the methods of system diagnostics. *Economy and entrepreneurship*, 2017, no. 1, pp. 996–1004 (in Russ.).

2. Kryzhanovskaya O.A. Structural and dynamic indicators of effective territorial development management: European experience. *Theory and practice of service*, 2017, no. 2, pp. 28–33 (in Russ.).

3. Orekhova E.A., Plyakin A.V. Spatial analysis and assessment of threats to the security of socio-economic development of small and medium-sized cities. *Volgograd State University Journal. Third Series: Economics, Ecology*, 2016, vol. 37, no. 4, pp. 65–81 (in Russ.).

4. Valentey S.D., Bakhtizin A.R., Bukhvald Ye.V., Kolchugina A.V. Development trends of the Russian regions. *Regional Economics*, 2014, vol. 39, no. 3, pp. 9–22.

5. Myzin A.L., Tatarkin A.I. The modeling of national wealth of the Russia's regions. *Regional Economics*, 2013, no. 4, pp. 53–65.

6. Krivorotov V.V., Kalina A.V., Erypalov S.E. Research and methodological foundations of the study of economic security in the system of sustainable and safe socio-economic development of territories. *Ural Federal University Journal*, 2014, no. № 5, pp. 121–132 (in Russ.).

7. Ivanchenko O.G., Golovanova L.A. Methodical provisions of regional zoning on the basis of energy saving. *TOGU Journal*, 2008, vol. 2, no. 9, pp. 57–68 (in Russ.).

8. Hoepfner F., Klawonn F., Kruse R., Runkler T. *Fuzzy cluster analysis: method for classification, data analysis, and image recognition*. NY, John Wiley & Sons, Inc., 1999, 300 p.
9. Silich V.A., Silich M.P., Axyonov S.V. An Approach to Speed-up the Density-based Clustering via Gustaffson-Kessel Fuzzy Algorithm. *Proceedings of 6th International Conference on Computer and Electrical Engineering (ICCEE 2013)*, Paris. ETP Press, 2013, pp. 167–172.
10. Sevilla-Villanueva B., Gibert K., Sanchez-Marre M. A methodology to discover and understand complex patterns: Interpreted Integrative Multiview Clustering (I2MC). *Pattern Recognition Letters. Pattern Recognition Techniques in Data Mining*, 2017, Vol. 93, pp. 85–94.
11. Feyereisl J., Aickelin U. STORM – A Novel Information Fusion and Cluster Interpretation Technique. *Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning (IDEAL 09), Lecture Notes in Computer Science 5788*, Burgos, Spain, 2009, pp. 208–218.
12. Cornforth D.J., Adam M.T.P. Cluster evaluation, description, and interpretation for serious games: player profiling in Minecraft. *In book: Serious Games Analytics: Methodologies for Performance Measurement, Assessment, and Improvement*, Springer, 2015, pp. 135–155.
13. De Carvalho F., Simões E. Fuzzy clustering of interval-valued data with City-Block and Hausdorff distances. *Neurocomputing*, 2017, Vol. 266, pp. 259–273.
14. Borsuk S.P. Properties of modifiers of compound linguistic variables terms. *Electronics and control systems*, 2012, no. 3, pp. 152–157 (in Russ.).
15. Rumbesht V.V. Expansion of the apparatus of the theory of fuzzy sets and linguistic variable to represent expert knowledge. *Research letters of Belgorod State University. Series: History, Political Science, Economics, and Computer Science*, 2012, Vol. 24, no. 19-1, pp. 141–148 (in Russ.).
16. Efremov A.A. New operations on fuzzy numbers and intervals. *Proceedings of TUSUR University*, 2013, vol. 1, no. 27, pp. 95–99. (in Russ.).
17. Silich M.P., Gribkov E.I., Silich V.A., Axyonov S.V. Method of generating names of clusters of territories in assessing their development levels. *Automation and modern technologies*, 2014, no. 11, pp. 34–40. (in Russ.).
18. *Edinaya mezhvedomstvennaya informacionno-statisticheskaya sistema* [Unified interdepartmental information and statistical system] Available at: <http://www.fedstat.ru/indicator/data.do>. (accessed May 25, 2017) (in Russ.).
19. *Official'nyj internet-portal Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki* [Official Internet Portal of Federal State Statistics Service] Available at: <http://www.gks.ru/> (accessed May 25, 2017) (in Russ.).

Maria P. Silich

Doctor of Engineering, Professor,
Department of Data Processing Automation
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-91
Email: mary.silich@yandex.ru

Sergey V. Axyonov

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor,
School of Computer Science & Robotics,
Tomsk Polytechnic University (TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-61-30
Email: axyonov@tpu.ru

УДК 004.722

А.В. Паращинец, А.Е. Ефремова

Нейросетевой алгоритм кластеризации узлов беспроводной сенсорной сети на основе самоорганизующейся карты Кохонена

Исследуется нейросетевой алгоритм кластеризации узлов беспроводной сенсорной сети на основе самоорганизующейся карты Кохонена. Рассматриваются различные критерии для кластеризации узлов беспроводной сенсорной сети. Представлены результаты моделирования алгоритма кластеризации узлов беспроводной сенсорной сети с помощью самоорганизующейся карты Кохонена.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, нейросетевой алгоритм, кластеризация, самоорганизация, топология сети.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-87-91

В настоящее время количество предметов окружающего мира, обладающих встроенным приемопередающим модулем, неуклонно растет [1]. К таким предметам относятся носимая электроника, предметы быта, различное промышленное оборудование и т.д. Появление такого направления развития не случайно, оно обусловлено неуклонно набирающей популярность концепцией «Интернет вещей», которая подразумевает объединение предметов окружающего нас физического пространства в локальные сети, а затем и в глобальную вычислительную сеть [2].

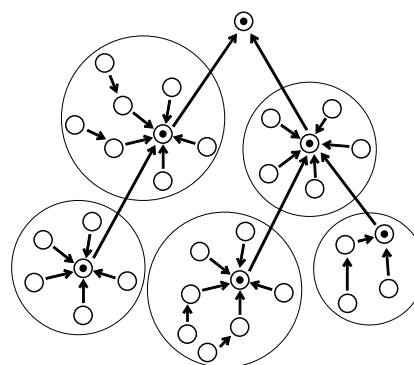
Одна из основополагающих технологий, лежащих в основе концепции Интернета вещей, – это беспроводные сенсорные сети.

Беспроводные сенсорные сети (БСС) – распределенные сети, состоящие из множества автономных приемопередающих модулей (узлов БСС), способных к самоорганизации и масштабированию [3].

БСС способны решать широкий спектр задач, таких как: мониторинг местности без вмешательства человека, обеспечение связи между подвижными объектами, создание адаптивных охранных систем и многое другое [4]. Такой широкий спектр решаемых задач ставит очень высокие и зачастую различные требования к сети.

На текущем этапе развития беспроводные сенсорные сети имеют множество реализаций, которые различаются по ряду критериев: методу доступа к каналу связи, структуре сети, способу маршрутизации сообщений в сети, составу аппаратной части, возможности подзарядки узлов и длительности автономной работы, наличию в сети устройств, принимающих решения, объему передаваемых данных, требованиям к надежности и др. [5].

Создание универсальной БСС, удовлетворяющей требованиям всех вышеперечисленных задач, технически невозможно, однако аналитически и практически установлено, что оптимальной конфигурацией сети по ряду параметров является иерархическая многоинтервальная модель построения [6]. На рис. 1 представлена иерархическая многоинтервальная модель БСС. В данной модели особо важным процессом, который определяет эффективность построения сети, является кластеризация узлов БСС.



⊙ - базовая станция;

○ - узел БСС.

Рис. 1. Иерархическая многоинтервальная модель БСС

Таким образом, нахождение оптимальных алгоритмов кластеризации, которые позволят максимально задействовать все имеющиеся узлы БСС и снизить энергопотребление сети в целом, является важной задачей для построения наиболее универсальной реализации БСС, удовлетворяющей наиболее широкому спектру задач.

Цели и задачи

Целью работы является совершенствование алгоритмов кластеризации узлов БСС путем использования нейросетевого алгоритма кластеризации, известного как самоорганизующаяся карта Кохонена.

Исходя из цели, были определены следующие задачи:

- 1) выбор признака для проведения кластеризации узлов БСС;
- 2) изучение алгоритма работы и математического аппарата самоорганизующейся карты Кохонена;
- 3) моделирование нейросетевого алгоритма самоорганизующейся карты Кохонена;
- 4) анализ результатов программного моделирования.

Выбор признака для кластеризации узлов

Кластеризация узлов, входящих в состав БСС, может производиться на основе нескольких признаков, таковыми могут являться [6]:

- месторасположение узлов сети;
- уровень остаточной энергии узла;
- уровень мощности сигналов узлов.

Использование данных о местоположении узлов в качестве критерия кластеризации сети имеет ряд недостатков, а именно:

- увеличивается вычислительная нагрузка на каждый узел;
- увеличивается энергопотребление каждого узла;
- увеличивается сложность конструкции узла;
- корректность работы системы полностью зависит от правильности определения местоположения каждого узла.

Таким образом, использование данных о местоположении не является универсальным критерием для кластеризации сети, хотя этот подход и может быть использован в ряде частных случаев БСС, равно как и уровень остаточной энергии узла, который не отражает реального состояния сети, в том числе связности топологии выстраиваемой сети.

Использование уровня мощности сигналов узлов, напротив, обладает рядом преимуществ:

- данные о взаимной мощности могут быть получены без усложнения конструкции узла БСС, напрямую с приемопередающего модуля;
- не увеличивается вычислительная нагрузка на узел;
- не увеличивается энергопотребление.

Поскольку концепция БСС подразумевает под собой низкие вычислительные затраты, а также низкое энергопотребление и простую конструкцию узлов, входящих в её состав, использование кластеризации на основе данных о мощности сигналов узлов друг к другу можно считать технически оправданным решением.

Самоорганизующаяся карта Кохонена

Самоорганизующаяся карта Кохонена (self-organizing map, SOM) – результат процесса непараметрической регрессии, который может использоваться для представления многомерных, нелинейно связанных элементов данных в наглядной форме, часто в виде двумерного изображения, а также для выполнения классификации без учителя и кластеризации [7]. Иными словами, SOM можно охарактеризовать как один из видов искусственной нейронной сети (ИНС), основанной на обучении без учителя.

Обобщенная модель карты самоорганизации Кохонена представлена на рис. 2 [7, 8]. Приведенная на рисунке конфигурация состоит из четырех нейронов и входного массива из трех элементов.

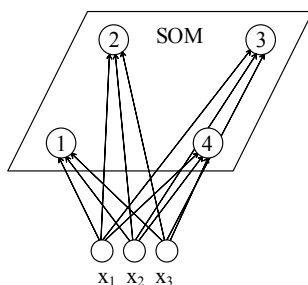


Рис. 2. Карта самоорганизации Кохонена

На рис. 2 приведена обобщенная модель SOM, в приведенной модели нейроны расположены на

двухмерной плоскости и представляют собой узлы карты SOM. Каждый элемент входного вектора X (входные данные) поступает на каждый из нейронов решетки. В свою очередь, каждый нейрон обладает вектором весовых коэффициентов W , который непрерывно обновляется в процессе обучения.

Необходимо отметить, что существуют различные конфигурации SOM, различия могут заключаться не только в количестве нейронов, входящих в состав решетки, но также и в конфигурации решетки, функции обновления весовых коэффициентов, также различными могут быть размерности массива данных X , поступающих на вход нейросети.

Обучение SOM может быть условно разделено на три этапа: конкуренция, кооперация и адаптация [7].

Алгоритм SOM для некоторой решетки нейронов можно кратко выразить в выполнении следующих пунктов [7–9]:

1. Для всех векторов решетки SOM происходит инициализация векторов весовых коэффициентов W_j размерностью, совпадающей с размером входных данных X ; в качестве значений весовых коэффициентов выбирается случайное значение от -1 до 1 , в некоторых случаях от 0 до 1 .

2. Происходит выбор вектора из входного пространства X .

3. Поиск победившего нейрона. В качестве метрики зачастую используется критерий минимума Евклидова расстояния между вектором входных значений и вектором весовых коэффициентов.

4. Вычисление топологической окрестности $h_{j,i}$ с учетом текущего шага обучения n вокруг победившего нейрона. Внутри топологической окрестности нейроны, соседствующие с победившим нейроном, изменяют свои весовые коэффициенты некоторым образом, а именно в соответствии с параметром скорости обучения η и нахождением внутри топологической окрестности. Победивший нейрон также изменяет свои весовые коэффициенты.

5. Изменяются параметры скорости обучения η , а также параметр эффективной ширины топологической окрестности σ , в соответствии с заданным законом изменения.

6. Происходит возвращение ко второму шагу.

Самоорганизующаяся карта Кохонена имеет следующие основные особенности:

- необходимость подбора констант τ_1 , τ_2 , а также начальных значений σ_0 и η_0 ;

- обучение SOM состоит из двух этапов: этап самоорганизации, в процессе которого происходит основной цикл обучения и изменения основных величин, и этап сходимости, на котором выполняется точная подстройка карты, а значение эффективной ширины и как следствие топологической окрестности больше не меняется;

- SOM преобразует непрерывное исходное пространство данных X в дискретное выходное пространство;

- SOM позволяет выявить неявную корреляцию между входными данными;

– SOM не имеет обратного распространения (back propagation, BP);

– SOM может обладать различной конфигурацией, т.е. сетка нейронов не обязательно должна быть квадратной, возможны также гексагональные и различные другие модификации расположения нейронов в сетке, все зависит от типа входных данных [7–9].

Моделирование нейросетевого алгоритма SOM и анализ результатов

Цель проведения моделирования кластеризации узлов БСС посредством нейросетевого алгоритма – самоорганизующейся карты Кохонена состоит в подтверждении возможности использования предложенного математического аппарата в качестве алгоритма кластеризации, а в качестве критерия для кластеризации – уровней мощности сигналов узлов БСС друг к другу.

Инструментами моделирования были выбраны язык программирования Python версии 3.6.4, а также фреймворки pandas, numpy и TensorFlow [10].

На вход SOM был подан массив, представляющий собой матрицу размером n на n , где n – количество узлов БСС, элементы матрицы P_{ij} представляют собой уровень мощности узла i по отношению к узлу j .

В случае если $i = j$, то $p_{ij} = 1$, так как узел по отношению к себе условно имеет максимальный уровень мощности излучения.

Подавая сформированный массив на вход самообучающегося алгоритма ИНС, можно выделить степень подобия между строками данного массива, иными словами, выделить кластеры в данных, а значит, и в узлах БСС. Приведены результаты кластеризации узлов при различных исходных данных.

1. Узлы распределены согласно равномерному распределению на квадратном поле с размером стороны 1000 м, дальность покрытия одного узла 200 м. Узлы разделены на 4 кластера с помощью алгоритма SOM (рис. 3).

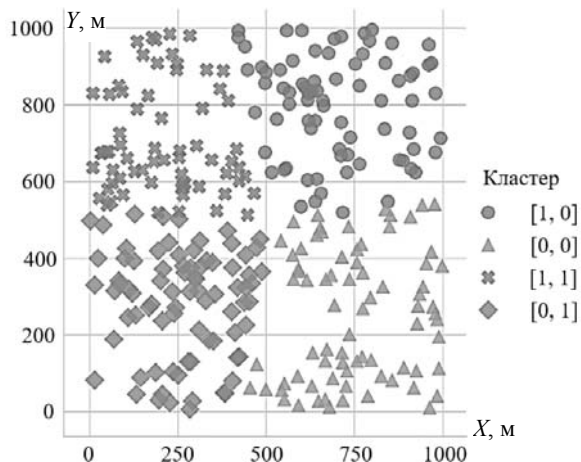


Рис. 3. Кластеризация равномерно распределенных узлов на 4 кластера

2. Узлы сосредоточены вокруг локальных центров на квадратном поле размером 1000 м, даль-

ность покрытия одного узла 200 м. Узлы разделены на 4 кластера с помощью алгоритма SOM (рис. 4).

3. Узлы распределены согласно равномерному распределению на квадратном поле с размером стороны 1000 м, дальность покрытия одного узла 200 м. Узлы разделены на 9 кластеров с помощью алгоритма SOM (рис. 5).

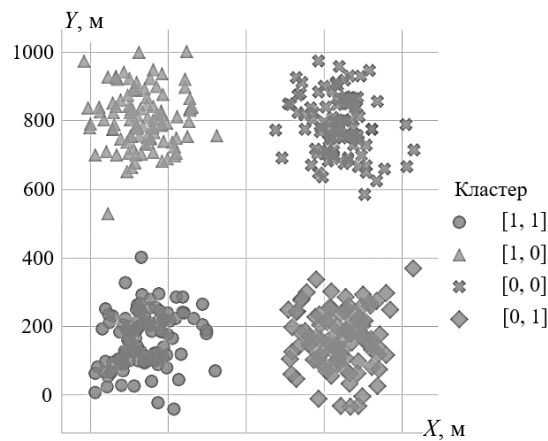


Рис. 4. Кластеризация равномерно распределенных узлов на 4 кластера

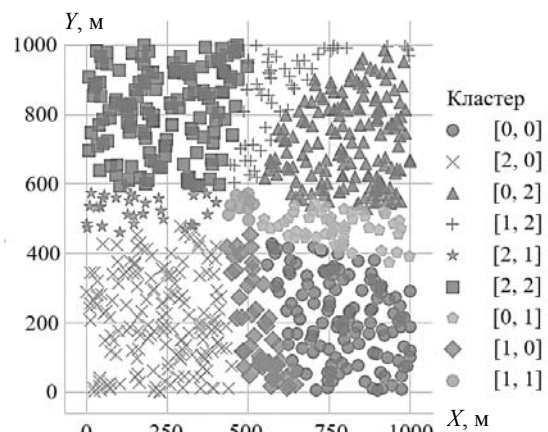


Рис. 5. Кластеризация равномерно распределенных узлов на 9 кластеров

Как видно из рис. 5, кластеризация в некоторых случаях может производиться неравномерно, это объясняется тем, что на этапе конкуренции в решетке возможно образование так называемых «мертвых нейронов», т.е. нейронов, векторы весовых коэффициентов которых в значительной степени отличаются от входных векторов. В результате чего эти нейроны никогда не выигрывают в процессе обучения, и с каждой итерацией эта разница между векторами весовых коэффициентов и входными векторами лишь усиливается. Таким образом, нейрон лишается возможности выиграть и становится «мертвым», следовательно, входные данные интерпретируются меньшим количеством классов, т.е. разбиваются на меньшее количество кластеров, чем необходимо [11, 12]. Это приводит к тому, что в ситуации, когда узлы будут представлять собой реальные физические устройства, неверная кластеризация может привести к

потере весомой доли связности в системе и некорректной работе всей БСС.

Проблему «мертвых нейронов» можно решить с использованием так называемого конструктивного метода обучения SOM [11, 12]. Суть этого метода обучения – дать всем нейронам одинаковый шанс выиграть на этапе конкуренции путем добавления параметра потенциала каждому нейрону при инициализации SOM. При этом параметр потенциала нейрона обновляется с каждой итерацией обучения согласно некоторому закону, по достижении минимального потенциала нейрон исключается из борьбы, нейроны, достигшие максимального потенциала, выигрывают по очереди, так как в каждом цикле только один из нейронов готов к борьбе.

Описанный алгоритм кластеризации на основе SOM может быть использован для создания реальной системы БСС посредством использования устройства Intel Movidius NCS. Intel Movidius NCS представляет собой модуль для нейронных вычислений и может быть задействован в переносимых устройствах с низким энергопотреблением [13–15].

Заключение

Актуальность проведенного исследования заключается в возможности использования в качестве алгоритма кластеризации узлов БСС метода машинного обучения, известного как самоорганизующаяся карта Кохонена и являющегося искусственной нейронной сетью. Использование методов машинного обучения, в частности искусственных нейронных сетей, позволит добиться высокой адаптивности процессов, выполняющихся во время функционирования БСС, что в свою очередь может повысить качество построения сети и добиться универсальности применений БСС для различных задач.

Тем не менее, как видно из моделирования процесса кластеризации, необходимо использовать дополнительные методики обучения самоорганизующейся карты Кохонена для препятствия образованию «мертвых нейронов». Одной из таких методик может служить конструктивный метод обучения SOM.

Литература

1. The Dynamic Demands of IoT in a Connected World [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.adventone.com/wp-content/files_mf/1464326780_Whitepaper-TheDynamicDemandsOfIoTinaConnectedWorld.pdf (дата обращения: 05.04.2018).
2. That 'Internet of Things' Thing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986> (дата обращения: 05.04.2018).
3. Росляков А.В., Ваняшин С.В., Гребешков А.Ю., Самсонов М.Ю. Интернет вещей / под ред. А.В. Рослякова. – Самара: ПГУТИ, Изд-во «Ас Гард», 2014. – 342 с.
4. Лаборатория физических основ и технологий беспроводной связи. Беспроводные сенсорные сети [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wl.unn.ru/study/?page=4> (дата обращения: 15.03.2018).
5. Кашпур М.А., Корилов А.М. Задачи оптимизации в беспроводных сенсорных сетях // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-23–2017):

доклады (материалы конференции) 23-й Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 24 ноября 2017 г. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2017. – С. 94–97.

6. Махров С.С. Исследование связности узлов в иерархических протоколах беспроводных сенсорных сетей // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: матер. междунар. науч.-техн. конф. «INTERMATIC–2013», 2–6 декабря 2013 г., Москва / под ред. А.С. Сигова. – М.: Энергоатомиздат, 2013. – Ч. 4. – С. 186–189.

7. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты: пер. с 3-го англ. изд. – 2-е изд. (эл.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 655 с.

8. Карта самоорганизации (Self-organizing map) на TensorFlow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/post/334810/> (дата обращения: 07.03.2018).

9. Нестандартная кластеризация 4: Self-Organizing Maps, тонкости, улучшения, сравнение с t-SNE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/post/338868/> (дата обращения: 08.03.2018).

10. Лутц М. Изучаем Python. – 4-е изд.: пер. с англ. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 1280 с.

11. Махров С.С. Нейросетевая кластеризация узлов беспроводной сенсорной сети // Т-КОММ: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – № 6. – С. 31–35.

12. Баталов А.С. Методы повышения эффективности обучения нейронной сети Кохонена // Вестник Перм. ун-та. Сер.: Математика. Механика. Информатика. – 2012. – Вып. 3 (11). – С. 86–93.

13. NCS SDK Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://movidius.github.io/ncsdk/> (дата обращения: 09.03.2018).

14. Intel Movidius Neural Compute Stick [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.movidius.com/> (дата обращения: 09.03.2018).

15. Mouser Electronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.mouser.com/new/intel/intel-movidius-stick/> (дата обращения: 09.03.2018).

Паращинец Александр Викторович

Аспирант каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-403-62-84
Эл. почта: alexandraparashchinec@gmail.com

Ефремова Алёна Евгеньевна

Магистрант каф. радиотехнических систем (РТС) ТУСУРА
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-403-62-68
Эл. почта: alena.e.efremova@gmail.com

Parashchinec A.V., Efremova A.E.

Neural network algorithm for clustering wireless sensor network nodes based on Kohonen self-organizing maps

The neural network algorithm for clustering the nodes of a wireless sensor network based on the Kohonen self-organizing map is investigated. Various methods for clustering nodes of a wireless sensor network are considered. The results of clustering modeling using a neural network algorithm for clustering the nodes of a wireless sensor network are

presented. A method to improve the quality of neural clustering network is also presented.

Keywords: wireless sensor network, neural network algorithm, clustering, self-organization, network topology.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-87-91

References

1. The Dynamic Demands of IoT in a Connected World. ADVENT ONE Publ. Available at: https://www.adventure.com/wp-content/files_mf/1464326780WhitepaperTheDynamicDemandsofIoTinaConnectedWorld.pdf (accessed: April 05, 2018).
2. That «Internet of Things» Thing. RFID JOURNAL Publ. Available at: <http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986> (accessed: April 05, 2018).
3. Roslyakov A.V., Vanyashin S.V., Grebeshkov A.Yu., Samsonov M.Yu. *Internet Veshchei: monografiya* [Internet of Things: a monograph]. Samara, Izd-vo «As Gard» Publ., 2014. 342 p. (in Russ.).
4. Laboratory of physical fundamentals and wireless technologies. Wireless sensor networks. Available at: <http://www.wl.unn.ru/study/?page=4> (accessed: March 15, 2018).
5. Kashpur M.A., Korikov A.M. Zadachi optimizatsii v bes-provodnykh sensorykh setyakh [Optimization problems in Wireless Sensor Networks]. *Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri* (SIBRESURS-23–2017): doklady (materialy konferentsii) 23-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. [Proc. of the twenty-third international scientific-practical conference]. Tomsk, TUSUR Publ., 2017, pp. 94–97 (in Russ.).
6. Makhrov S.S. Issledovanie svyaznosti uzlov v ier-arkhicheskikh protokolakh besprovodnykh sensorykh setei. [Investigation of the connectivity of nodes in the hierarchical protocols of wireless sensor networks] *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «INTERMATIC-2013»* [Fundamental problems of radio electronic instrument making: Materials of Int. scientific-techn. Conf. «INTERMATIC-2013»]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2013, vol. 4, pp. 186–189.
7. Kohonen T. *Self-organizing maps*. 3rd ed. Luxembourg, 2001. 502 p. (Russ. ed.: Strigunova M.S., Lozinskaya N.A., Novak N.A. Samoorganizuyushchiesya karty. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2014. 655 p.).
8. Self-organizing map on TensorFlow. Available at: <https://habr.com/post/334810/> (accessed March 07, 2018).
9. Non-standard clustering 4: Self-Organizing Maps, subtleties, improvements, comparison with t-SNE. Available at: <https://habr.com/post/338868/> (accessed: March 08, 2018).
10. Lutz M. *Learning Python*. 4th ed. O'Reilly Media, 2010. 1628 p. (Russ. ed.: Galunov A., Makarova N., Shchegolev P., Bochina Yu., Minin S., Chubarov K. *Izuchaem Python*. Saint Petersburg, Simvol-Plyus Publ., 2011. 1280 p.).
11. Makhrov S.S. Neural network clustering of wireless sensor network nodes. *T-COMM: Telecommunications and Transport*, 2014, no. 6, pp. 31–35 (in Russ.).
12. Batalov A.S. Methods for increasing the efficiency of training the Kohonen neural network. *Bulletin of Perm University. Series «Mathematics, Mechanics, Informatics»*, 2012, vol. 3, no. 11, pp. 86–93 (in Russ.).
13. NCSDK Documentation. Available at: <https://movidius.github.io/ncsdk/> (accessed: March 09, 2018).
14. Intel Movidius Neural Compute Stick. Available at: <https://developer.movidius.com/> (accessed: March 09, 2018).
15. Mouser Electronics. Available at: <https://ru.mouser.com/new/intel/intel-movidius-stick/> (accessed: March 09, 2018).

Alexander V. Parashchinec

PhD student, Department of Automated Control System, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-403-62-84
Email: alexandrparashchinec@gmail.com

Alena E. Efremova

Master student, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-403-62-68
Email: alena.e.efremova@gmail.com

УДК 62.002(063)

А.М. Кориков, Я.Е. Мещеряков

Ориентация горных технологических машин на основе микроэлектромеханических систем

Параметры ориентации горных технологических машин (ГТМ), определяемые с применением микроэлектромеханических систем (МЭМС), на практике оказываются чувствительными к внешним воздействиям, сильно зашумленными, а также в некоторых случаях имеют накапливающуюся ошибку ориентации. Эффективный способ нивелирования шумов и накапливающейся ошибки ориентации заключается в использовании специализированных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) путем комбинирования (комплексирования) показаний нескольких МЭМС-датчиков. Эффективная фильтрация сигналов МЭМС-датчиков является основой для повышения точности ориентации функциональных элементов ГТМ.

Сравнительный анализ комплексующих фильтров выделяет фильтр Маджвика в реализации MARG на фоне других фильтров. Данная реализация фильтра компенсирует магнитные искажения, выполняет коррекцию магнитного склонения и нивелирует дрейф МЭМС-гироскопа по оси рыскания. Для электрических ГТМ, построенных по схеме Варда–Леонарда, предлагается способ функционирования комплексующего фильтра Маджвика в реализации MARG посредством имитации работы магнетометра с помощью глобальной навигационной спутниковой системы.

Ключевые слова: горные технологические машины, микроэлектромеханические системы, инерциальный измерительный модуль, фильтр Калмана, фильтр Маджвика, система мониторинга и позиционирования, автоматизация, имитация магнетометра, навигационная спутниковая система.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-92-97

В добывающих отраслях промышленности предъявляются высокие требования к качеству функционирования горных технологических машин (ГТМ), на которых, как правило, отсутствуют регистрирующие устройства для мониторинга и позиционирования функциональных элементов ГТМ [1–3]. В литературе [1–3] доказываемся, что такие регистрирующие устройства успешно реализуются на основе современных микроэлектромеханических систем (МЭМС) – гироскопов и акселерометров.

Применение МЭМС-датчиков в инерциальных измерительных системах требует использования специализированных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС). Одним из способов нивелирования шумов при ЦОС является комбинирование (комплексирование) показаний МЭМС-датчиков, нивелирующее их недостатки [3].

На базе МЭМС-датчиков и вычислительного устройства, реализующего алгоритмы ЦОС, формируется инерциальный измерительный модуль (ИИМ). ИИМ, состоящий из акселерометра и гироскопа, получил название AHRS (англ. Attitude and Heading Reference System – система определения пространственного положения), ИИМ, состоящий из акселерометра, гироскопа и магнетометра, получил название MARG (англ. Magnetic, Angular Rate, and Gravity – магнитная, угловая скорость и гравитация) [4]. ИИМ является частным случаем платформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) [5].

Из анализа алгоритмов работы фильтров [6] следует, что коррекция большинства комплексующих фильтров осуществляется за счет компонентов опорных векторов или гравитационных полей. Разнообразие комплексующих фильтров может быть представлено пятью основными типами:

1. Фильтр Калмана (Бьюси–Стратановича) и его модификации [7–9].
2. Комплементарный фильтр (композитный / альфа-бета, фильтр Калмана с фиксированной моделью и комплементарный фильтр второго порядка) [10–12].
3. Алгоритм направляющих косинусных матриц (фильтр Премерлани и Бизарда) [13].
4. Фильтр Махони [14].
5. Фильтр Маджвика [15].

Возможные модификации комплексующих фильтров [16] представляют собой вариации перечисленных выше основных типов фильтров и получили широкое распространение в любительских конструкциях (беспилотные летательные аппараты (дроны) и т.п.). В [3] решается задача разработки автоматизированной системы мониторинга и позиционирования (АСМП) функциональных элементов ГТМ для позиционирования, идентификации рабочих циклов и оценки параметров технологического процесса экскавации горной массы. В АСМП используются МЭМС-измерения динамических характеристик функциональных элементов ГТМ в режиме реального времени и обработка результатов с помощью специализированного программного обеспечения. Производственные испытания АСМП [3], выполненные в 2017 и 2018 гг., подтвердили эффективность АСМП и определили пути модернизации системы. Одним из главных направлений модернизации АСМП является повышение точности ориентации функциональных элементов ГТМ за счет эффективной фильтрации сигналов МЭМС-датчиков.

Общая постановка задачи разработки автоматизированной системы мониторинга и позиционирования (АСМП) функциональных элементов горных технологических машин (ГТМ) обсуждается в [1–3].

Далее рассматривается задача повышения точности ориентации функциональных элементов ГТМ за счет эффективной фильтрации сигналов МЭМС-датчиков: сравнительный анализ комплексирующих фильтров, обоснование выбора фильтра Маджвика в реализации MARG, проблемы его применения в АСМП ГТМ и их решение с помощью глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).

Сравнительный анализ комплексирующих фильтров

Самым популярным фильтром из вышеперечисленных является фильтр Калмана [7], получивший распространение во многих областях науки и техники. В [17] проведен сравнительный анализ фильтров Калмана и Маджвика в реализации AHRS [15], т.е. фильтра на основе акселерометра и гироскопа, для решения задачи фильтрации сигналов БИНС путем моделирования в среде «Matlab Simulink». Из результатов моделирования следует, что переходные процессы в фильтре Калмана протекают быстрее, чем в фильтре Маджвика в реализации AHRS. Ошибка фильтрации для фильтра Калмана также значительно меньше, чем для фильтра Маджвика, следовательно, установившиеся значения выходных сигналов в фильтре Калмана ближе к истинным значениям параметров ориентации объекта [17]. В нашей задаче объектом является ГТМ. В [3] проведено исследование комплексирующих фильтров, которое позволяет сделать более общие выводы:

1. Фильтр Калмана имеет широкую область применения, высокую достоверность показаний, хорошее качество фильтрации, оценивает и прогнозирует состояние системы, имеет множество возможных реализаций, позволяющих подобрать фильтр для определенной задачи.

Недостатки фильтра: сложен в настройке, для функционирования требуется быстродействующее вычислительное устройство, необходима высокая частота дискретизации, которая может превышать физические возможности объекта, обязательно наличие математической модели датчиков, избыточен для АСМП ГТМ.

2. Применение комплементарного фильтра первого и второго порядков нецелесообразно ввиду того, что фильтр не функционирует по оси рыскания.

3. Фильтр направляющих косинусных матриц оперирует матрицей поворота, что порождает проблему «шарнирного замка» – вырождения матрицы при повороте на 90° град, расчет кинематики и коррекция данных адаптированы для особенностей динамики летательных аппаратов. Алгоритм базируется на фильтре Махони.

4. Фильтр Махони значительно нивелирует ошибку ориентации по оси рыскания, но не устраняет ее полностью, по сути, представляет собой ПИ-регулятор [18]. Для фильтра характерны отсутствие дрейфа и перманентная ошибка ориентации, реализация MARG уступает точности реализации AHRS.

5. Фильтр Маджвика не выполняет коррекцию по оси рыскания без магнетометра, функционирующая

осуществляется по аналогии с работой комплементарного фильтра по осям крена и тангажа. Использование магнетометра эффективно нивелирует ошибку дрейфа нуля гироскопа и угловой ориентации по оси рыскания, т.е. разработка АСМП ГТМ должна быть основана на комплексирующем фильтре Маджвика в реализации MARG. Этот фильтр компенсирует магнитные дисторсии (искажения) и ошибки магнитного склонения вследствие отклонения чувствительного элемента от горизонта, корректирует дрейф гироскопа по оси рыскания.

Фильтр Маджвика в реализации MARG

Особенностью фильтра Маджвика в реализации MARG является то, что он функционирует на основе показаний инерциальных датчиков (ускорение, угловая скорость) и характеристик магнитного поля Земли, оптимизирует свою работу на основе градиентного метода. Анализ показал, что этот фильтр – один из современных комплексирующих фильтров для определения ориентации в пространстве [15]. Схема фильтра в реализации MARG представлена на рис. 1.

Фильтр Маджвика использует кватернионы для описания пространственного положения объекта. Для понимания принципа работы фильтра Маджвика сделаем некоторые пояснения по рис. 1. Переменные, системы отсчета и векторы на этом рисунке индексируются надстрочными и подстрочными индексами, введенными Крэйгом в [19]: впереди стоящий нижний индекс соответствует базовой системе отсчета, а впереди стоящий верхний индекс – системе отсчета, относительно которой задана переменная. То есть индекс E обозначает координатную систему отсчета Земли, а индекс S – координатную систему отсчета датчика.

В блоке «Группа 1», выделенной на схеме фильтра на рис. 1, компенсируются магнитные искажения: контролируемое направление магнитного поля Земли ${}^E\hat{h}_t$ в земных координатах в момент времени t рассчитывается как нормированное значение данных магнетометра ${}^S\hat{m}_t$:

$${}^E\hat{h}_t = \begin{bmatrix} 0 & h_x & h_y & h_z \end{bmatrix} = {}^S\hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^S\hat{m}_t \otimes {}^E\hat{q}_{est,t-1}^*$$

Здесь ${}^S\hat{q}_{est,t-1}$ – комплексирующая функция фильтра; ${}^E\hat{q}_{est,t-1}^*$ – комплексно-сопряженная комплексирующая функция фильтра.

Ошибочный наклон корпуса магнетометра, как следствие неправильной проекции магнитного поля Земли на магнетометр в контролируемом направлении, корректируется при условии, если относительное направление магнитного поля Земли ${}^E\hat{b}_t$ имеет одинаковый наклон в течение всего времени, что достигается расчетом ортогональных векторов ${}^E\hat{b}_t$ и ${}^E\hat{h}_t$ по оси крена и тангажа:

$${}^E\hat{b}_t = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{h_x^2 + h_y^2} & 0 & h_z \end{bmatrix}.$$

Данный способ коррекции нивелирует магнитные искажения по осям крена и тангажа, магнитные возмущения влияют только на курс (по оси рыскания).

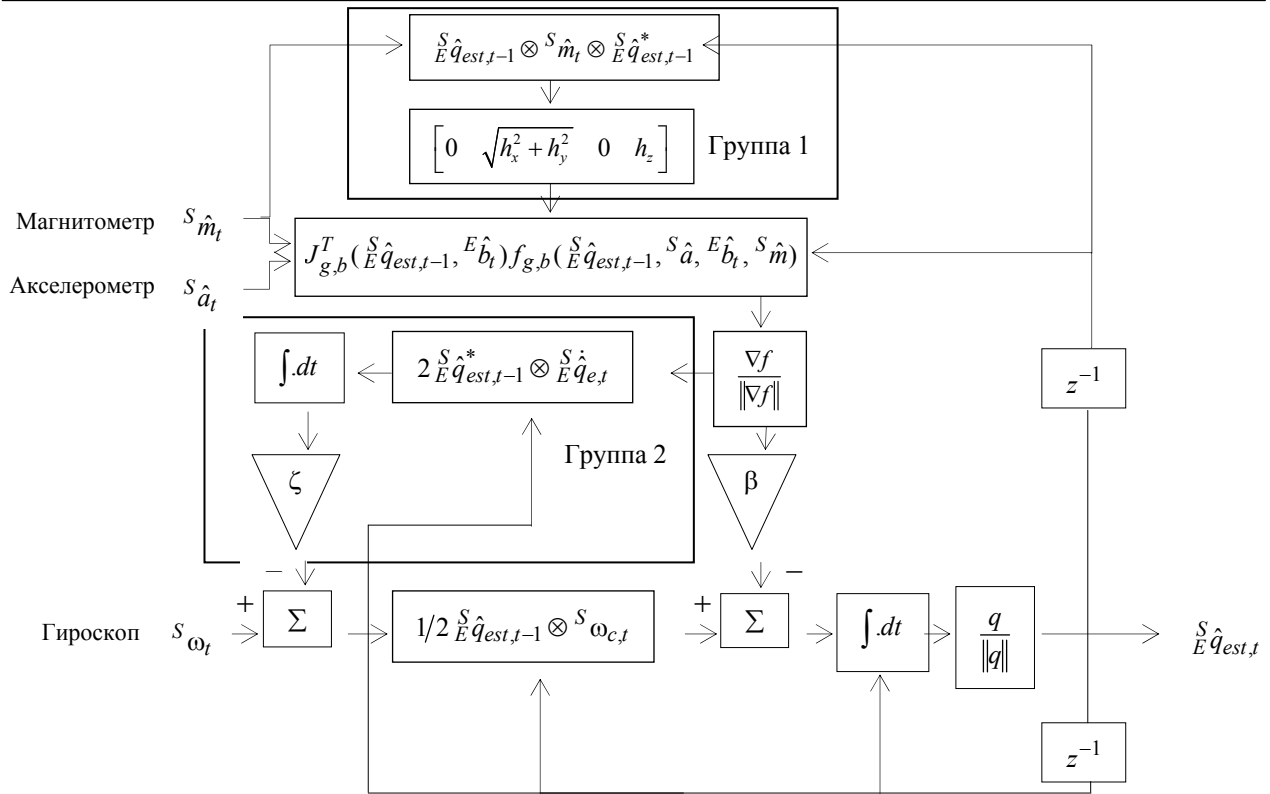


Рис. 1. Фильтр Маджвика в реализации MARG: группа 1 – коррекция магнитных искажений; группа 2 – коррекция дрейфа гироскопа

В блоке «Группа 2», выделенной на схеме фильтра на рис. 1, осуществляется коррекция дрейфа гироскопа. Смещение (дрейф) гироскопа может быть представлено как часть ошибки от скорости изменения ориентации $S \hat{q}_{e,t}$:

$$S \omega_{e,t} = 2 S \hat{q}_{est,t-1} \otimes S \hat{q}_{e,t}.$$

Дрейф гироскопа $S \omega_b$ представлен как постоянная составляющая $S \omega_e$, которая может быть удалена, так как часть $S \omega_e$ является средневзвешенным с соответствующим коэффициентом усиления ζ :

$$S \omega_{b,t} = \zeta \sum_t S \omega_{e,t} \Delta t,$$

$$S \omega_{c,t} = S \omega_t - S \omega_{b,t}.$$

Скомпенсированные измерения гироскопа $S \omega_c$ могут быть использованы вместо исходных измерений гироскопа.

Фильтр Маджвика в реализации MARG (см. рис. 1) имеет два коэффициента усиления:

- коэффициент β представляет суммарные ошибки гироскопа, представленные как величина производной кватерниона;

- коэффициент усиления ζ характеризует скорость сходимости для нивелирования ошибок измерений гироскопа, не связанных с нулем, выражен как производная кватерниона.

Данные ошибки характеризуют смещение гироскопа. Коэффициенты представлены как угловые

величины, где ω_b – оценка средней погрешности измерения дрейфа гироскопа по каждой оси, ω_e – расчетная скорость дрейфа гироскопа в каждой оси. Коэффициент усиления β рассчитывается по следующей формуле:

$$\beta = \left\| \frac{1}{2} \tilde{q} \otimes \begin{bmatrix} 0 & \tilde{\omega}_\beta^k & \tilde{\omega}_\beta^m & \tilde{\omega}_\beta^p \end{bmatrix} \right\| = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_\beta, \quad (1)$$

где \tilde{q} – единичный (базисный) кватернион.

Коэффициент усиления ζ рассчитывается по формуле

$$\zeta = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_\zeta. \quad (2)$$

Фильтр Маджвика в реализации MARG использует систему гиперкомплексных чисел (кватернионы), которую можно корректировать показаниями акселерометра и гироскопа при выполнении аналитических вычислений. Система гиперкомплексных чисел оптимизируется методом градиента для расчета вектора направления погрешности гироскопа в виде производной системы гиперкомплексных чисел. Оптимизация работы методом градиента позволяет задавать режим работы фильтра Маджвика в реализации MARG двумя коэффициентами, которые можно корректировать в процессе работы. Невысокие требования к вычислительному устройству позволяют реализовать АСМП на отечественных МК или ПЛИС.

Отличительные особенности фильтра Маджвика в реализации MARG:

- два регулируемых параметра, рассчитываемых на основе реакции системы по формулам (1) и (2);
- высокая эффективность при небольших частотах дискретизации;
- высокая производительность (277 арифметических операций на каждую итерацию обновления фильтра).

Применение кватерниона для ориентации в трехмерном пространстве позволяет избежать проблемы «шарнирного замка» (складывание рамок или gimbal lock), связанных с углами Эйлера–Крылова.

Фильтр позволяет компенсировать дрейф гироскопа и магнитные искажения в текущий момент работы. Ошибка ориентации рассчитывается с помощью метода градиента.

Комплексирование данных, полученных с датчиков, выполняется с помощью пропорционального звена и дискретного интегрирования, углы Эйлера–Крылова используются в качестве опорных координат, относительно которых рассчитывается ошибка скорости вращения.

Имитация магнетометра посредством ГНСС

ГТМ (драглайны и мехлопаты) являются электрическими машинами, поэтому функционирование магнетометра (электронного компаса) крайне затруднительно из-за возникающих магнитных дисторсий, исходящих от металлических частей конструкции и силовых агрегатов. Функционирование ИИМ АСМП в комплектации с магнетометром на гидравлических ГТМ (карьерный буровой станок) показало возможность применения фильтра Маджвика в реализации MARG (с магнетометром): достаточно рассчитать поправку в зависимости от места установки магнетометра и выполнять периодическую калибровку. Для электрических ГТМ предлагаемое решение состоит в имитации работы магнетометра для фильтра Маджвика посредством определения курса (истинного путевого угла) при помощи глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Определение путевого угла с помощью ГНСС позволит имитировать показания магнетометра и сделает возможным выполнить коррекцию фильтра Маджвика, а также вести альманах угловых перемещений ГТМ относительно путевого угла. Имитацию можно осуществить двумя способами:

1) использование одного приёмника ГНСС, установленного на максимально возможном удалении от центра вращения ГТМ – L с последующим накоплением массива координат;

2) использование двух приёмников ГНСС для работы в дифференциальном режиме, при котором один приемник ГНСС устанавливается непосредственно в центре вращения ГТМ и служит опорной станцией, а второй приемник устанавливается на максимально возможном удалении от центра вращения ГТМ. Применение двух приемников ГНСС формирует две точки, по которым определяется прямая, указывающая угол азимута.

Первый способ установки приемника ГНСС представлен на рис. 2; второй способ – на рис. 3.

В [3] использован первый способ установки приемника ГНСС. Он располагался на расстоянии 9,9 м от геометрического центра вращения ГТМ. При расчетах расстояние L принимается равным 10 м. Первый способ установки приемника ГНСС требует определения координат центра вращения ГТМ, и вычисление путевого угла сводится к решению обратной пространственной задачи [3]. Использование двух приемников ГНСС (второй способ) значительно упрощает определение путевого угла.

Кроме этого, дифференциальный режим позволяет значительно повысить точность определения благодаря одинаковому влиянию искажений сигнала ГНСС, создаваемых ионосферой и тропосферой на близко расположенные приемники.

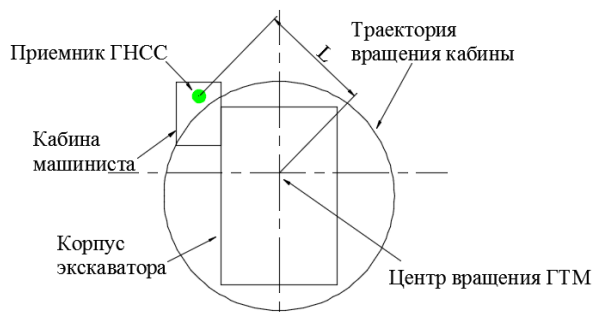


Рис. 2. Имитация магнетометра посредством накопления массива координат движения кабины

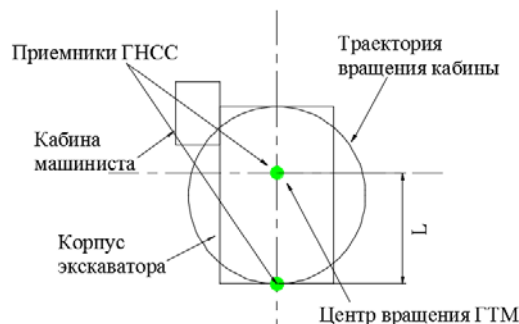


Рис. 3. Имитация магнетометра посредством определения азимута, заданного двумя приемниками ГНСС

Применение двух приемников ГНСС позволяет также реализовать высокоточный фазовый метод определения координат относительно базовой станции RTK (Real Time Kinematics – кинематика реального времени) или DGPS (Differential Global Positioning System – дифференциальная коррекция). Данная реализация потребует увеличения вычислительной мощности АСМП, наличия операционной системы, функционирующей в реальном времени, и специализированной библиотеки глобального навигационного спутникового позиционирования [20].

Выводы

Задача повышения точности ориентации функциональных элементов ГТМ успешно решается фильтрацией сигналов МЭМС-датчиков (акселерометра, гироскопа и магнетометра) комплексующим фильтром Маджвика в реализации MARG. Функционирование магнетометра (электронного

компаса) на ГТМ затруднено постоянно возникающими магнитными дисторсиями, исходящими от металлических частей конструкции ГТМ и силовых агрегатов. Эффективное решение этой проблемы состоит в имитации работы магнетометра для фильтра Маджвика с помощью глобальной навигационной спутниковой системы.

Литература

1. Мещеряков Я.Е. Автоматизация контроля положения платформы карьерного бурового станка / Я.Е. Мещеряков, А.М. Кориков // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 94–97.
2. Мещеряков Я.Е. Автоматизированный мониторинг работы экскаватора в условиях угольного разреза // Вестник КузГТУ. – 2015. – №4. – С. 121–125.
3. Мещеряков Я.Е. Автоматизация процессов мониторинга и позиционирования функциональных элементов горных технологических машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2018. – 20 с.
4. Madgwick S.O.H. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm / S.O.H. Madgwick, A.J.L. Harrison, R. Vaidyanathan // Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on. – 2011. – P. 1–7.
5. Бранец В.Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1992. – 280 с.
6. IMU Data Fusing: Complementary, Kalman, and Mahony Filter. URL: <http://www.olliw.eu/2013/imu-data-fusing/> (дата обращения: 23.05.2018).
7. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering. – 1960. – No. 82. – P. 35–45.
8. Foxlin E. Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter // Virtual Reality Annual International Symposium, 1996. Proceedings of the IEEE 1996. – 1996. – P. 185–194.
9. Sabatini A.M. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2006. – Vol. 53, No. 7. – P. 1346–1356.
10. Bachmann E.R. Orientation tracking for humans and robots using inertial sensors / E.R. Bachmann, I. Duman, U.Y. Usta et al. // Proc. of 1999 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Monterey, CA, December, 1999. – P. 187–194.
11. Fusion of data from quadcopter's inertial measurement unit using complementary filter. – URL: http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/116099/IMU_data_processing_final.pdf?sequence=2&isAllowed=y. (дата обращения: 23.05.2018).
12. Wu J. et al. Fast complementary filter for attitude estimation using low-cost MARG sensors // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16, No. 18. – P. 6997–7007.
13. Direction cosine matrix IMU: Theory. – URL: https://www.researchgate.net/publication/265755808_DCM_IMU_Theory (дата обращения: 23.05.2018).
14. Mahony R. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group / R. Mahony, T. Hamel, J.M. Pflimlin // IEEE Transactions on automatic control. – 2008. – Vol. 53, No. 5. – P. 1203–1218.
15. Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays // Report x-io and University of Bristol (UK). – 2010. – Vol. 25. – P. 113–118.
16. Project-specific collection of technical information. – URL: <https://lewpayne.blogspot.com/2010/06/oteher.html>. (дата обращения: 23.05.2018).
17. Яцына Ю. Сравнительный анализ дискретных фильтров Калмана и Маджвика / Ю. Яцына, Ю. Гриднев, А. Шведко // Наука и инновации. – 2017. – № 2 (168). – С. 22–24.
18. Кориков А. М. Основы теории управления: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. – Томск: НТЛ, 2002. – 392 с.
19. Craig John J. Introduction to Robotics Mechanics and Control. – Pearson Education International, 2005. – 400 p.
20. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual [Электронный ресурс] / Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf – RTKLIB ver. 2.4.2 Manual (дата обращения: 05.11.2018).

Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. АСУ ТУСУРа
вед. науч. сотр. Томского ф-ла
Института вычислительных технологий СО РАН
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-42-79
Эл. почта: korikov@asu.tusur.ru

Мещеряков Ярослав Евгеньевич

Аспирант ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-906-937-22-09
Эл. почта: M.YarosLove@yandex.ru

Korikov A.M., Meshcheryakov Y.E.

Orientation of mining technology machines based on microelectromechanical systems

The orientation parameters of mining process machines (MMM), determined using MEMS sensors, in practice are sensitive to external influences and very noisy, and in some cases there is an orientation error accumulating. An effective way to level noise and cumulative orientation errors is to use specialized digital signal processing (DSP) algorithms by combining (complexing) the readings of several MEMS sensors. Effective filtering of MEMS sensor signals is the basis for improving the accuracy of orientation of the functional elements of geological and technical measures. Comparative analysis of complexing filters highlights the Madgwick filter in the MARG implementation, compared to other filters. This implementation of the filter compensates for magnetic distortion, corrects the magnetic declination, and levels the drift of the MEMS gyro along the yaw axis. For electric geological and technical measures built according to the Ward-Leonard scheme, a method is proposed for the functioning of the Madgwick complexing filter in the implementation of MARG by simulating the operation of a magnetometer using a global navigation satellite system.

Keywords: mining technological machines, microelectromechanical systems, inertial measuring module, Kalman filter, Madgwick filter, monitoring and positioning system, automation, magnetometer imitation, navigation satellite system.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-92-97

References

1. Meshcheryakov Ya. E. Automation of control of the position of the platform of an open-pit drilling rig /

Ya.E. Meshcheryakov, A.M Korikov // Proceedings of TUSUR University. – 2016. – Vol. 19, No. 3. – P. 94–97.

2. Meshcheryakov Ya.E. Automated monitoring of excavator operation under coal mine conditions // Vestnik KuzGTU. – 2015. – №4. – P. 121–125.

3. Meshcheryakov Ya. E. Automation of the monitoring and positioning of the functional elements of mining technological machines. Avtoreferat Diss. ... kand. techn. nauk. Tomsk, 2018. – 20 p.

4. Madgwick S.O.H. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm / S.O.H. Madgwick, A.J.L. Harrison, R. Vaidyanathan // Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on. – 2011. – P. 1–7.

5. Branets V.N. Introduction to the theory of free-form inertial navigation systems / V.N. Branets, I.P. Shmyglevsky. – M.: Science, 1992. – 280 p.

6. IMU Data Fusing: Complementary, Kalman, and Mahony Filter. URL: <http://www.olliw.eu/2013/imu-data-fusing/>. (accessed: May 23, 2018).

7. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering, 1960, No. 82, p. 35–45.

8. Foxlin E. Inertial head-tracker sensor fusion by Kalman filter // Virtual Reality Annual International Symposium, 1996. Proceedings of the IEEE 1996. 1996, p. 185–194.

9. Sabatini A.M. Quaternion – based extended Kalman filtering for filtering // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2006, vol. 53, no. 7, p. 1346–1356.

10. Bachmann E.R. Orientation tracking for humans and robots using inertial sensors / E.R. Bachmann, I. Duman, U.Y. Usta et al. // Proc. of 1999 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Monterey, CA, December, 1999, pp. 187–194.

11. Fusion of data from quadcopter's inertial measurement unit using complementary filter. URL: http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/116099/IMU_data_processing_final.pdf?sequence=2&isAllowed=y. (accessed: May 23, 2018).

12. Wu J. et al. Fast complementary filter for attitude estimation using low-cost MARG sensors // IEEE Sensors Journal. 2016, т. 16, no. 18, h. 6997–7007.

13. Direction cosine matrix IMU: Theory. URL: https://www.researchgate.net/publication/265755808_DCM_IMU_Theory. (accessed: May 23, 2018).

14. Mahony R. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group / R. Mahony, T. Hamel, J.M. Pflimlin // IEEE Transactions on automatic control, 2008, vol. 53, no. 5, p. 1203–1218.

15. Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial / magnetic sensor arrays // Report x-io and University of Bristol (UK), 2010, vol. 25, p. 113–118.

16. Project – specific collection of technical information. URL: <https://lewpayne.blogspot.com/2010/06/oteher.html>. (accessed: May 23, 2018).

17. Yatsyna Yu. Comparative analysis of discrete Kalman and Madgwick filters / Yu. Yatsyna, Yu. Gridnev, A. Shvedko // Science and Innovations, 2017, no. 2 (168), p. 22–24.

18. Korikov A.M. Fundamentals of management theory: studies. manual for universities, 2nd ed. Tomsk: NTL, 2002, 392 p.

19. Craig John J. Introduction to Robotics Mechanics and Control. Pearson Education International, 2005, 400 h.

20. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. [Electronic resource]. Systems Requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf – RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. (accessed: November 05, 2018).

Anatoly M. Korikov

Doctor of Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Automated Control Systems Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050;
Leading researcher at Tomsk Branch of the Institute of Computing Technologies SB RAS
Phone: +7 (382-2) 41-42-79
Email: korikov@asu.tusur.ru

Yaroslav E. Meshcheryakov

PhD student, Department of Automated Control Systems Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-906-937-22-09
Email: M.YarosLove@yandex.ru

УДК 519.248

А.А. Любченко, Е.Ю. Копытов, А.А. Богданов

Статистическое моделирование качественных показателей эксплуатации и технического обслуживания средств железнодорожной электросвязи в среде AnyLogic

Оборудование электросвязи является функциональной подсистемой железнодорожного транспорта, безопасность и эффективность которого в полной мере зависят от надежного функционирования используемых средств связи. Одним из наиболее популярных сегодня методов поддержания требуемого уровня надежности технологического оборудования на сети железных дорог является проведение технического обслуживания. Для оценки эффективности проводимых профилактических мероприятий используется утвержденный показатель качества технического обслуживания, тогда как для оценки качества процесса эксплуатации в целом применяется коэффициент готовности. Расчет указанных показателей, как правило, выполняется на основе данных о произошедших отказах оборудования, что обладает как существенными преимуществами, так и очевидными недостатками в случае отсутствия или затруднительного получения опытных данных. Современные компьютерные технологии позволяют автоматизировать и значительно упростить процесс оценки целевых показателей качества, что, однако, требует разработки математического обеспечения для выполнения такого анализа. В работе предлагается имитационная модель процесса эксплуатации устройств железнодорожной электросвязи, позволяющая в автоматизированном режиме давать оценку коэффициенту готовности и показателю качества технического обслуживания. Модель учитывает возникновение внезапных, скрытых и ложных отказов устройств, влияние готовности комплектов запасных частей, ошибочных действий обслуживающего персонала, а также периодичности и продолжительности обслуживания и ремонта при оценке качественных показателей. В основу модели положен принцип дискретно-событийного моделирования, реализуемый в отечественном программном обеспечении AnyLogic.

Ключевые слова: железнодорожная электросвязь, качество, коэффициент готовности, AnyLogic.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-98-108

Железнодорожная электросвязь является одной из функциональных подсистем инфраструктуры железнодорожного транспорта, объединяющая технические средства и сооружения связи, обеспечивающие передачу и (или) прием голосовой и (или) негосударственной информации, предназначенной для организации и выполнения технологических процессов железнодорожного транспорта [1]. В соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 33397–2015 «Железнодорожная электросвязь. Общие требования безопасности» к железнодорожной электросвязи (ЖДЭ) относится обширный перечень устройств, от средств коммутации и цифровых транспортных систем до оборудования электропитания средств связи. Очевидно, функциональное назначение средств ЖДЭ определяет высокие требования к их надежности, что является ключевым аспектом при организации эффективного и безопасного перевозочного процесса. Однако, как показывает практика, доля эксплуатационных отказов в системах связи на железнодорожном транспорте остается существенной и составляет 60% [2]. При этом значительное количество средств отдельных групп оборудования уже полностью выработали свой ресурс или эксплуатируются с превышением срока службы. В частности, у пятой части парка локомотивных радиостанций фиксируется стопроцентный износ. С истекшим сроком службы эксплуатируется более 60% стационарных и более 65% возимых радиостанций [2].

Одним из основных методов поддержания требуемого уровня надежности средств ЖДЭ является

организация и проведение комплекса профилактических мероприятий по техническому обслуживанию (ТО). При этом управляемое обслуживание является перспективным видом ТО, так как призвано свести к минимуму регламентированное ТО и сократить долю корректирующего обслуживания [3]. Периодичность проведения работ при управляемом ТО определяется дирекциями связи железных дорог с учетом местных условий эксплуатации, анализа статистики отказов за предыдущие периоды и требований к качеству предоставляемых услуг связи. Очевидно, что наиболее адекватное планирование работ может быть сделано по статистическим данным об отказах.

Однако для этого требуется наличие опытных образцов оборудования, а получение релевантного объема статистических данных может потребовать существенно продолжительной эксплуатации и (или) испытаний. Учитывая влияние средств ЖДЭ на безопасность и эффективность перевозочного процесса, такой подход может привести к значительным материальным затратам. Таким образом, применение данного подхода как для устройств, уже находящихся в эксплуатации непродолжительный период времени, так и для вновь внедряемых систем представляется затруднительным.

Одной из возможных альтернатив решения указанной проблемы является применение имитационных моделей процесса эксплуатации средств ЖДЭ. Основное назначение таких моделей заключается в статистическом или вероятностном моделировании переходов технической системы из одного состояния

в другое, имитируя тем самым процесс эксплуатации средств ЖДЭ. В таком случае имеется возможность сбора статистических данных по результатам моделирования и дальнейшего расчета качественных показателей. На основе же полученных оценок можно делать вывод о правильности организации эксплуатации устройств, в частности, периодичности проведения профилактических мероприятий по ТО.

Ранее в работе [4] нами была рассмотрена упрощенная модель процесса эксплуатации средств ЖДЭ с учетом внезапных отказов оборудования и выполняемого ТО. Вычислительные эксперименты с такой моделью дают завышенные оценки качественных показателей, что свидетельствует о необходимости её усовершенствования для учета большего числа факторов и особенностей процесса технической эксплуатации средств ЖДЭ.

В частности, надежность рассматриваемого оборудования зависит от достоверности как встроенных подсистем контроля, так и диагностических устройств, используемых на этапах профилактических работ и восстановительного ремонта, что в свою очередь обуславливает возникновение скрытых и ложных отказов устройств. Выполнение операций по ТО и ремонту осуществляется персоналом структурных подразделений железных дорог, что требует учета влияния человеческого фактора, а также степени готовности комплектов запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП).

Как показано в работе [5], при построении моделей количественной оценки надёжности систем связи необходимо уделять особое внимание учёту ошибок диагностической аппаратуры (контроля), которые являются причиной возникновения скрытых и ложных отказов. Проведенный анализ литературы позволил сделать вывод об актуальности вопросов оценки надёжности технических систем, в том числе и средств связи с учётом влияния ошибок контроля [6–9].

Вопрос влияния ошибочных действий персонала на надёжность достаточно проработан и рядом исследований доказано, что качественная подготовка обслуживающего штата и следование рекомендациям по эксплуатации позволяют добиться увеличения надёжности аппаратуры в 3–5 раз [10, 11]. По результатам факторного анализа, выполненного по данным единой системы мониторинга и администрирования сетей связи ОАО «РЖД», установлено, что более трети отказов устройств связи вызывается неправильными действиями обслуживающего персонала [2]. Следовательно, необходимость учета человеческого фактора при моделировании процессов эксплуатации средств ЖДЭ является обоснованной.

Восстановление работоспособности средств ЖДЭ осуществляется силами структурных подразделений железных дорог. Поэтому степень готовности необходимого комплекта ЗИП, используемого при ремонтных работах, оказывает непосредственное влияние на оперативность устранения отказов и, следовательно, качественные показатели процесса

эксплуатации. Многими исследованиями, результаты которых представлены в [12, 13], доказано существенное влияние готовности комплектов ЗИП на надежность восстанавливаемых систем, примером которых являются рассматриваемые средства железнодорожной электросвязи.

Таким образом, объектом исследования в данной работе является процесс эксплуатации и технического обслуживания средств железнодорожной электросвязи, учитывающий возникновение внезапных, скрытых и ложных отказов оборудования, а также влияние готовности ЗИП и человеческого фактора при проведении восстановительного ремонта и профилактических работ. Целью исследования является анализ показателей качества эксплуатации и ТО средств ЖДЭ на основе данных имитационного моделирования.

Основным комплексным показателем надежности средств железнодорожной электросвязи является коэффициент готовности [5, 14, 15]. Выполненный анализ литературы показал, что показатели надежности восстанавливаемых систем широко используются при решении задачи оценки качества технической эксплуатации, в том числе для средств радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи [16], структурно-сложных территориально рассредоточенных систем связи [17], а также систем управления движением поездов [18]. В данной работе коэффициент готовности K_T предлагается использовать как показатель качества эксплуатации технических средств ЖДЭ, а качество ТО оценивать с помощью удельного показателя B_y , регламентируемого положением «О показателе качества технического обслуживания средств связи», утвержденным распоряжением ОАО «РЖД» от 20 августа 2014 г. № ЦСС-767/р (далее – положение).

Одним из востребованных в настоящее время подходов к оценке и анализу характеристик процессов функционирования систем различного назначения является имитационное моделирование, называемое также статистическим при учёте случайных свойств отдельных элементов модели. В работах [19, 20] подчеркивается преимущество такого вида моделирования перед эмпирическим подходом для случая высоконадежных систем, когда из-за крайне редкого возникновения отказов невозможна оценка показателей надежности с приемлемой точностью. Как результат, статистическое моделирование не только применяется при анализе надёжностных характеристик автотранспортных систем [20, 21] и радиоэлектронных средств со сложными алгоритмами резервирования [22], но и является востребованным инструментом для оценки системной надёжности компонентного программного обеспечения [23]. Не ограничиваясь задачами анализа надёжности, имитационное моделирование является удобным и эффективным методом при исследовании транспортных потоков в железнодорожной сети [24–26].

Сегодня в распоряжении специалистов, занимающихся разработкой имитационных моделей,

имеется продукт отечественного происхождения AnyLogic [27], представляющий собой визуальную среду, объединяющую «все три современные парадигмы построения имитационных моделей: системно-динамическая, дискретно-событийная и агентная» [28]. Кроме того, отличительными особенностями данного продукта являются мощный язык моделирования и интуитивно понятный графический интерфейс, обеспечивающий упрощение и ускорение процесса разработки.

Таким образом, для обеспечения возможности анализа показателей качества эксплуатации и технического обслуживания средств ЖДЭ поставлена задача разработки имитационной модели процесса эксплуатации и ТО с помощью инструмента AnyLogic. Модель предназначена для оценки коэффициента готовности K_T и удельного показателя качества технического обслуживания B_y с учётом внезапных, скрытых и ложных отказов устройств, влияния готовности ЗИП и ошибочных действий обслуживающего персонала при выполнении ТО и ремонта. Проведение статистических экспериментов с моделью позволяет выполнять анализ влияния указанных факторов на качественные показатели K_T и B_y , что может быть использовано при планировании технического обслуживания в качестве инструмента поддержки принятия решений. Помимо учета большего количества факторов в сравнении с ранее рассмотренным подходом в работе [4], преимущество предлагаемой модели является расчет показателя B_y в соответствии с действующим положением об оценке качества технического обслуживания оборудования связи на сети дорог ОАО «РЖД». Анализ литературы показал отсутствие возможных аналогов разработанной модели.

Имитационная модель

Разработка любой имитационной модели начинается с формирования концептуального описания исследуемого процесса, или, по-другому, концептуальной модели. Для наглядности концептуальное описание дополняется графической моделью, в виде графа или диаграммы состояний. Для рассматриваемого процесса эксплуатации и ТО диаграмма состояний изображена на рис. 1.

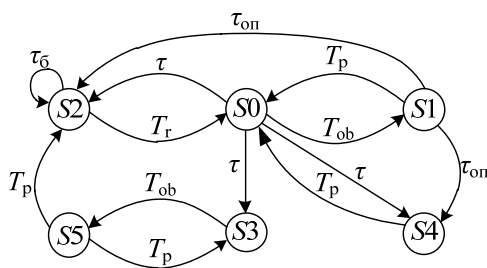


Рис. 1. Графическая модель процесса эксплуатации и ТО средств ЖДЭ

Граф на рис. 1 демонстрирует переходы между следующими состояниями:

- S_0 – работоспособное;
- S_1 – состояние технического обслуживания;

- S_2 – неработоспособное;
- S_3 – состояние скрытого отказа системы;
- S_4 – состояние ложного отказа системы;
- S_5 – состояние технического обслуживания системы в скрытом отказе.

В соответствии с теорией надежности период нормальной эксплуатации большинства технических систем характеризуется постоянством интенсивности отказов [29]. В этот период в первую очередь преобладают внезапные отказы, что обусловлено влиянием внешних случайных факторов. В таком случае зависимость вероятности отказа Q от времени t определяется по экспоненциальному закону в соответствии с выражением

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов, 1/ч.

Следовательно, переход из работоспособного состояния S_0 в неработоспособное S_2 происходит в результате внезапного отказа по экспоненциальному закону через случайный интервал времени τ . После проведения ремонта, если персонал не допустил ошибку, система возвращается в работоспособное состояние S_0 через время T_r . Если же при проведении восстановительного ремонта допущена ошибка, то система находится в состоянии S_2 в течение времени τ_b до следующего ремонта.

Переходы в состояние S_2 происходят случайным образом, тогда как переходы в состояние технического обслуживания S_1 реализуются через регламентированный интервал времени, соответствующий периодичности обслуживания $T_{об}$. Работы по ТО выполняются обслуживающим персоналом региональных центров связи. В силу человеческого фактора с вероятностью $E_{ор}$ может быть допущена ошибка, которая приведет к отказу устройства, что будет соответствовать переходу в состояние S_2 через время $\tau_{оп}$. После безошибочного выполнения операций по ТО, выполняемого в течение времени T_p , аппаратура продолжает нормальное функционирование в состоянии S_0 .

Помимо рассмотренных состояний система через случайные интервалы времени τ в результате ошибочного определения технического состояния встроенными системами контроля может перейти в состояние скрытого S_3 или ложного S_4 отказа. Основными характеристиками систем контроля в работе приняты вероятности ошибки диагностирования первого (a) и второго рода (b). Ошибка a задается вероятностью ложной тревоги, т.е. когда работоспособное устройство признается неработоспособным, тогда как ошибка b определяется вероятностью пропуска отказа и, следовательно, неработоспособное устройство диагностируется как работоспособное. Наряду со встроенными системами контроля причиной возникновения скрытых и ложных отказов может быть внешнее диагностическое оборудование, используемое при проведении ТО. Данный вид оборудования также характеризуется ошибками диагностирования a_2 и b_2 , а встроенные системы контро-

ля – ошибками a_1 и b_1 . Определение того, что произошел один из двух рассматриваемых отказов, производят в течение времени T_p . Единственное и главное отличие заключается в том, что состояние ложного отказа S_4 диагностируется мгновенно, тогда как скрытый S_3 отказ может быть обнаружен во время ТО, выполняемого через интервалы $T_{об}$. Следовательно, в модели предусмотрено отдельное состояние технического обслуживания системы в скрытом отказе S_5 . При этом из-за ошибочных действий персонала в процессе такого обслуживания система может обратно вернуться в состояние скрытого отказа S_3 .

Техническая эксплуатация средств железнодорожной электросвязи предусматривает формирование и поддержание необходимого количества запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП). Готовность ЗИП в модели предлагается учитывать двумя параметрами: вероятностью отсутствия запасных частей (P_n) и временем ожидания ЗИП ($dopvr$). Данные параметры влияют на продолжительность восстановительного ремонта T_r . Учет влияния отсутствия ЗИП и времени его доставки реализуется в состоянии S_2 при выполнении функции подсчета штрафных баллов.

Инциденты, вызванные сбоями и/или неработоспособностью средств ЖДЭ, классифицируются на отказы и технологические нарушения. Положение предусматривает три категории отказов и две категории технологических нарушений, каждая из которых соответствует определенному количеству штрафных баллов B_0 . На устранение инцидента отводится среднесетевое время восстановления работоспособности $t_{св}$, регламентируемое Положением. В случае, если фактическое время восстановления $t_{ф}$ превысило среднесетевое, то итоговая балльная оценка B вычисляется по формуле

$$B = B_0 + 0,5 \cdot B_0 (t_{ф} - t_{св}) / t_{св}. \quad (2)$$

Если же восстановление работоспособности средств электросвязи было проведено в течение времени, не превышающего среднесетевое $t_{св}$, то итоговая балльная оценка за инцидент B равняется B_0 .

Таким образом, итоговые балльные оценки B по всем возникшим инцидентам суммируются и в конце каждого месяца вычисляется удельный показатель качества ТО B_y в расчете на каждые 100 технических единиц (ТЕ) обслуживаемого оборудования по формуле

$$B_y = \frac{\sum B}{T_0 / 100} = \frac{\sum B}{T_0} \cdot 100, \quad (3)$$

где B_y – удельный показатель качества обслуживания средств связи в штрафных баллах; $\sum B$ – суммарное количество штрафных баллов по всем инцидентам за месяц; T_0 – техническая оснащённость устройствами электросвязи, ТЕ.

Техническая оснащённость средствами электросвязи T_0 на участках железной дороги измеряется в технических единицах (ТЕ), расчет которых про-

изводится в соответствии с действующей методикой определения объема работ региональных центров связи [30].

Далее полученный удельный показатель B_y в штрафных баллах (ш/б) интерпретируется соответствующей категорией качества: «Отлично» – от 0 до 14,5 ш/б, «Хорошо» – свыше 14,5 ш/б до планируемой величины ш/б (B_n), «Удовлетворительно» – свыше B_n до 80 ш/б и «Неудовлетворительно» – свыше 80 ш/б. Планируемая величина штрафных баллов B_n устанавливается ежемесячно вышестоящей организацией, дирекцией связи. Возможность изменения B_n введено для управления качеством ТО. Постепенно величина B_n должна уменьшаться, тем самым стимулируя повышение качества обслуживания средств ЖДЭ.

Следовательно, удельный показатель качества B_y выступает в качестве оценки эффективности мероприятий по поддержанию оборудования ЖДЭ в работоспособном состоянии, т.е. качества технического обслуживания. Тогда как оценка того, насколько качественно в целом организована эксплуатация средств электросвязи, может быть дана с помощью комплексного показателя надёжности – коэффициента готовности K_r . Данный показатель представляет собой отношение времени исправной работы к сумме времён исправной работы и интервалов восстановительного ремонта.

Для рассматриваемой модели коэффициент готовности K_r рассчитывается по формуле

$$K_r = \frac{TS_0 + TS_4}{TS_0 + TS_2 + TS_3 + TS_4}, \quad (4)$$

где TS_0 – суммарное время пребывания в работоспособном состоянии S_0 ; TS_2 – суммарное время простоя, обусловленное переходом устройства в состояние S_2 и выполнением восстановительного ремонта; TS_3 , TS_4 – суммарное время пребывания в состояниях скрытого и ложного отказов соответственно.

Таким образом, выполняя статистическое моделирование исследуемого процесса с графом состояний на рис. 1 путем многократной реализации прогонов (испытаний) модели, появляется возможность сбора статистических данных о пребывании системы в каждом состоянии S_i , $i = [0, 5]$. На основе полученных данных вычисляется оценка коэффициента готовности K_r в виде среднего значения.

Для реализации имитационной модели выбрана отечественная среда моделирования AnyLogic. Модель в AnyLogic представляет собой набор объектов (инструментов), совместное использование которых позволяет задавать логику протекания различного рода процессов. Для рассматриваемого процесса эксплуатации средств ЖДЭ на рис. 1 применяются инструменты дискретно-событийного моделирования. К таким инструментам в среде AnyLogic версии 7 относятся «Диаграмма состояний» и объект «Событие».

«Диаграмма состояний» (Statechart) представляет собой ориентированный граф конечного автомата с возможностью задания условий, при которых бу-

дет происходить переход, а также набор действий, вызванных сменой состояний. Переходы между состояниями могут происходить в результате истечения заданного тайм-аута, выполнения заданного условия или получения сообщения.

«Событие» служит инструментом для моделирования временных интервалов возникновения событий, чья работа реализуется в трёх различных режимах: по тайм-ауту, при выполнении условия, с заданной интенсивностью. В данной работе был использован режим работы с заданной интенсивностью.

Для хранения и обработки данных, получаемых в ходе моделирования, были использованы такие инструменты, как «База данных», «Набор данных» и «Коллекция».

«Коллекция» представляет собой набор данных одного типа, размер которого в отличие от массива может динамически изменяться при моделировании. Для сохранения значений целевых параметров при изменении других, например, модельного времени, по ходу работы модели может использоваться инструмент «Набор данных», являющийся двухмерным массивом конечного размера. По окончании эксперимента его результаты (выходные параметры модели: среднее значение K_T и B_y) записываются во встроенную базу данных.

Диаграмма состояний в разработанной модели повторяет граф на рис. 1, где моделирование переходов реализуется случайным образом и задается с помощью свойств и дополнительного кода на языке Java в каждом состоянии. В качестве примера рассмотрим алгоритм выполнения кода работоспособного состояния S_0 , с которого начинается каждый новый прогон модели. Для наглядности алгоритм работы представлен в виде псевдокода 1.

Псевдокод 1. Алгоритм работоспособного состояния S_0

НАЧ.

Сгенерировать сл. число $\xi \leftarrow U(0,1)$

ЕСЛИ: вер-ть перехода из S_0 в $S_2 \geq \xi$

ТО: Сгенерировать τ

$$TS_0 = TS_0 + \tau$$

Активировать переход в S_2

ИНАЧЕ ЕСЛИ: вер-ть перехода из S_0 в $S_4 \geq \xi$

ТО: Сгенерировать τ

$$TS_0 = TS_0 + \tau$$

Активировать переход в S_4

ИНАЧЕ ЕСЛИ: вер-ть перехода из S_0 в $S_3 \geq \xi$

ТО: Сгенерировать τ

$$TS_0 = TS_0 + \tau$$

Активировать переход в S_3

ИНАЧЕ: $TS_0 = TS_0 + T_{об}$

Сгенерировать $T_p \leftarrow N(sig * T_{p0}, T_{p0})$

Активировать переход в S_1

ВСЕ

КОН.

В начальный момент времени или при возврате в состояние S_0 , в первую очередь, выполняется розыгрыш случайной величины ξ по равномерному закону в интервале от 0 до 1. Далее полученное чис-

ло последовательно сравнивается с вероятностями перехода из состояния S_0 в возможные состояния S_2 , S_4 и S_3 . При выполнении одного из условий генерируется значение величины τ , соответствующее интервалу времени в часах, через который произойдет переход, далее сохраняется текущее значение τ в переменной TS_0 и активируется переход, соответствующий выполненному условию.

Инициализация интервала времени τ для экспоненциального закона надежности в соответствии с методом обратного преобразования [31] выполняется по формуле

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \ln(\xi), \quad (5)$$

где λ – интенсивность отказов, задаваемая при моделировании, $1/\lambda$; ξ – случайное число с равномерным законом распределения в интервале $[0, 1]$.

Выход из состояния S_0 происходит по тайм-ауту через время τ или через задаваемый пользователем интервал периодичности обслуживания $T_{об}$, если ни одно из условий псевдокода 1 не выполняется и активируется переход в состояние технического обслуживания S_1 . При этом для учета того факта, что в действительности время выполнения профилактических работ по ТО может варьироваться, в псевдокоде 1 переменная T_p инициализируется случайным числом с нормальным распределением с заданными среднеквадратичным отклонением sig и математическим ожиданием T_{p0} .

Отдельное внимание в структуре имитационной модели необходимо уделить функции, выполняющей оценку принятого в работе показателя качества технического обслуживания B_y . Этот элемент модели, графическая схема алгоритма которого приведена на рис. 2, реализован в соответствии с уже упомянутым ранее положением «О показателе качества технического обслуживания средств связи». Действия, описанные в алгоритме, выполняются каждый раз, когда система переходит в неработоспособное состояние S_2 .

Так как в Положении возможные инциденты с оборудованием ЖДЭ разделяются на три категории отказов и две категории технологических нарушений, то в блоке 1 на рис. 2 выполняется случайный розыгрыш типа инцидента. Для этого генерируется случайное число ξ с равномерным законом распределения в интервале от 0 до 1 и далее последовательно сравнивается с эмпирическими данными о возникновении того или иного инцидента. В текущей реализации модели заданы значения для каждого типа инцидента на основе статистических данных об отказах и нарушениях, произошедших за период с 2014 по 2016 г. в хозяйстве связи одного из участков Западно-Сибирской железной дороги: отказы I категории составляют 0,03; II категории – 0,01; III категории – 0,7 и технологические нарушения I и II категории – по 0,13. Так как рассматривается полная группа несовместных событий, то после проверки ранее сгенерированного случайного числа ξ по всем возможным условиям будет определен тип инцидента, для которого после блока 2 будут выполне-

ны дальнейшие действия, соответствующие именно этому инциденту. Так, например, в случае отказа I категории Положение предусматривает начисление 80 или 40 штрафных баллов B_0 и среднесетевое время восстановления $t_{св}$ в течение 4 или 0,5 ч, поэтому в блоке 3 случайно с вероятностью 0,5 выбирается размер баллов B_0 и время устранения инцидента $t_{св}$.

Фактическое время $t_{ф}$ устранения инцидента определяется аналогично времени проверки при техническом обслуживании T_p , т.е. задается случайным числом с нормальным распределением с тем же самым СКО sig , но математическое ожидание специализируется значением переменной $vrRI$ (блок 4). Данный входной параметр задается пользователем и характеризует среднее время ремонта при отказе I категории.

В случае отсутствия необходимого комплекта ЗИП, в блоке 5 на рис. 2 генерируется значение времени ожидания запасных частей $t_{зип}$ в соответствии с нормальным распределением с СКО sig и математическим ожиданием $dopvrI_0$. Далее фактическое время устранения инцидента $t_{ф}$ обновляется в соответствии с необходимым временем ожидания ЗИП.

Следовательно, если фактическое время $t_{ф}$ превышает среднесетевое время $t_{св}$, то в блоке 6 балльная оценка B будет вычислена с учетом задержки восстановления работоспособности по формуле (2). Далее в блоке 7 выполняется расчет удельного количества штрафных баллов в соответствии с выражением (3).

Таким образом, моделируя процесс эксплуатации устройств связи в соответствии с графом состояний на рис. 1, имеется возможность сформировать статистические данные о времени пребывания в каждом состоянии $S_i, i = [0, 5]$ и на их основании дать оценку принятому показателю качества эксплуатации, коэффициенту готовности K_T по формуле (4), тогда как оценка удельного показателя качества ТО B_y выполняется с помощью разработанной пользовательской функции при каждом переходе в неработоспособное состояние S_2 . Управление процессом моделирования выполняется средствами среды AnyLogic, после запуска модели на выполнение имитация анализируемого процесса начинается автоматически с работоспособного состояния S_0 , и далее случайным образом в соответствии с заданными условиями реализуются переходы между состояниями. Один прогон модели выполняется в течение модельного времени $vrpr$; при достижении которого имитация процесса начинается заново с состояния S_0 . При этом вычисление оценок выходных параметров модели, коэффициента K_T и удельного показателя B_y реализуется раз в месяц по модельному времени, следовательно, если $vrpr$ равняется 100 лет, то модель формирует 1200 оценок. Для получения средних значений оценок эксперимент с моделью предполагает выполнение kr прогонов с последующим усреднением всех 1200 оценок по всем прогонам. Требуемое количество прогонов kr может быть вычислено в соответствии с рекоменда-

циями, приведенными в [32]. В частном случае, при доверительной вероятности, равной 0,95, и доверительном интервале 0,05 каждый эксперимент с моделью требует выполнения 2000 прогонов.

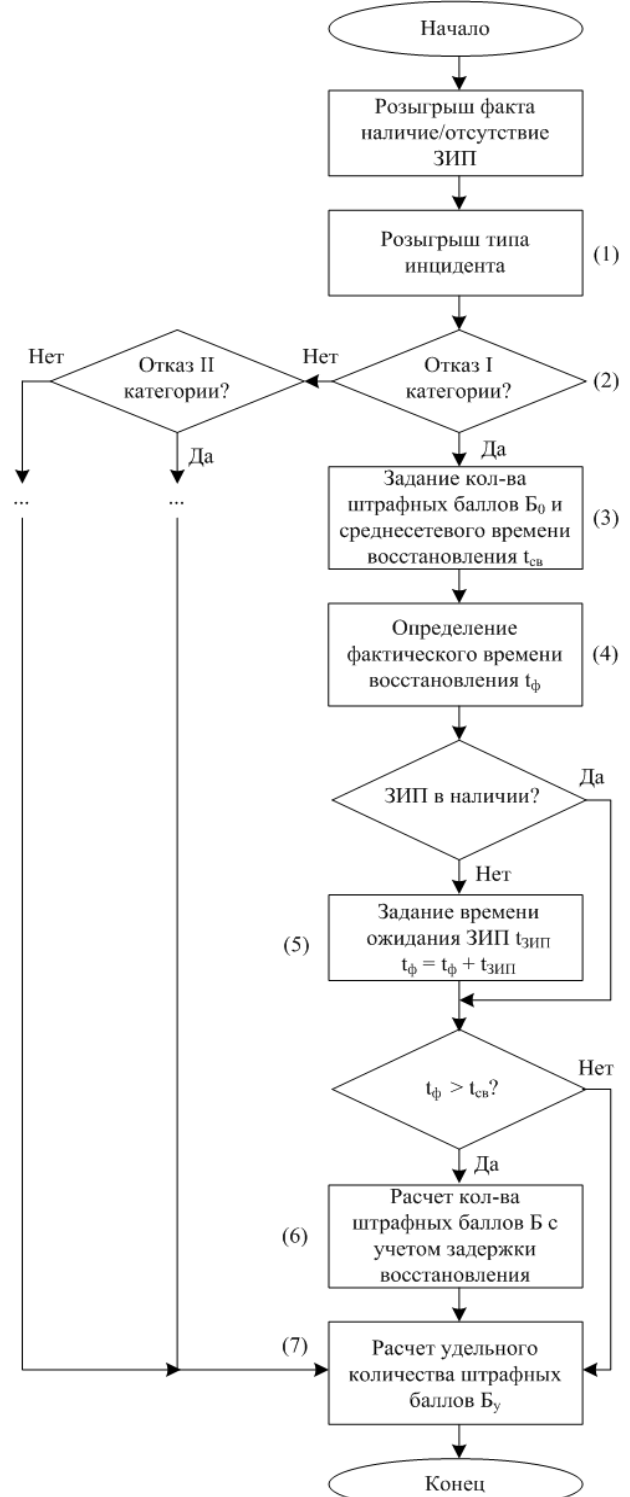


Рис. 2. Графическая схема алгоритма функции оценки качества ТО

Эксперименты с моделью

Для демонстрации работы разработанной имитационной модели был выполнен ряд вычислительных экспериментов, в ходе которых получены гра-

фики оценок коэффициента готовности K_T (рис. 3, а) и линейно аппроксимированные графики оценок показателя качества обслуживания B_y (рис. 3, б) от времени. Цель эксперимента – дать оценку влияния интенсивности отказов устройств на показатели K_T и B_y . При этом коэффициент готовности K_T характеризует качество эксплуатации средств связи в целом, тогда как B_y используется для оценки качества проводимых мероприятий по техническому обслуживанию устройств. Таким образом, было выполнено шесть экспериментов для следующих значений интенсивности отказов λ : 5, 6, 7, 8, 9 и $10 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Значения остальных неизменяемых в ходе эксперимента входных параметров приведены в таблице.

Семейство кривых зависимости оценок коэффициента готовности от времени при различных значениях интенсивности отказов, представленное на рис. 4, а, является примером реализации функций коэффициента готовности, полученных экспериментально с помощью разработанной модели.

Как можно наблюдать, полученные экспериментальные кривые нелинейно убывают, начиная с максимально возможного значения, равного единице, что согласуется с принятым в модели допущением о том, что процесс эксплуатации средств ЖДЭ начинается строго с работоспособного состояния S_0 . Данное допущение основывается на функциональном предназначении средств ЖДЭ и их влиянии на безопасность перевозочного процесса, следовательно, для таких устройств период приработки должен быть исключён.

При этом наглядно демонстрируется влияние интенсивности отказов λ на величину коэффициента готовности и как результат на качество организации эксплуатации средств ЖДЭ. Если задаться минимальным допустимым уровнем коэффициента готовности, например 0,99, то в рассматриваемом случае только для интенсивности отказов $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч оценка коэффициента K_T по всей оси времени будет отвечать заданным требованиям. Следовательно,

можно утверждать о качественной эксплуатации оборудования с параметрами из таблицы и интенсивностью $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

Анализируя экспериментальный график зависимости удельного показателя качества технического обслуживания B_y (см. рис. 3, б), можно отметить закономерный рост усредненного значения показателя с увеличением интенсивности отказов для значений 5, 6, 7, 8, 9 и $10 \cdot 10^{-5}$ 1/ч, составивший в среднем 16,7; 13,3; 14,5; 12,8 и 7,5% соответственно.

Значения входные неизменяемых параметров модели

Параметр	Значение
Математическое ожидание времени ожидания ЗИП при: отказах, $doprI_0 - dopvrIII_0$ технологических нарушениях, $doptnI_0$, $doptnII_0$, ч	24 12
Вероятность отсутствия ЗИП $QZIP$	0,1
Техническая оснащённость средствами связи T_0 , т.е.	600
Периодичность технического обслуживания $T_{об}$, ч	8640
Математическое ожидание времени проверки $T_{р0}$, ч	3
Математическое ожидание времени восстановительного ремонта при: отказе первой категории, $vrRI$ отказе второй категории, $vrRII$ отказе третьей категории, $vrRIII$ технологическом нарушении первой и второй категории, $vrRtnI$ и $vrRtnII$, ч	10 5 2,5 1,25
Вероятность ошибки обслуживающего персонала, $E_{оп}$	0,126
Вероятность ошибки первого рода встроенных средств диагностики, a_1	0,01
Вероятность ошибки первого рода внешних средств диагностики, a_2	0,005
Вероятность ошибки второго рода встроенных средств диагностики, b_1	0,02
Вероятность ошибки второго рода внешних средств диагностики, b_2	0,05
Количество прогонов kr	2000
Время одного прогона $vrpr$, лет	100

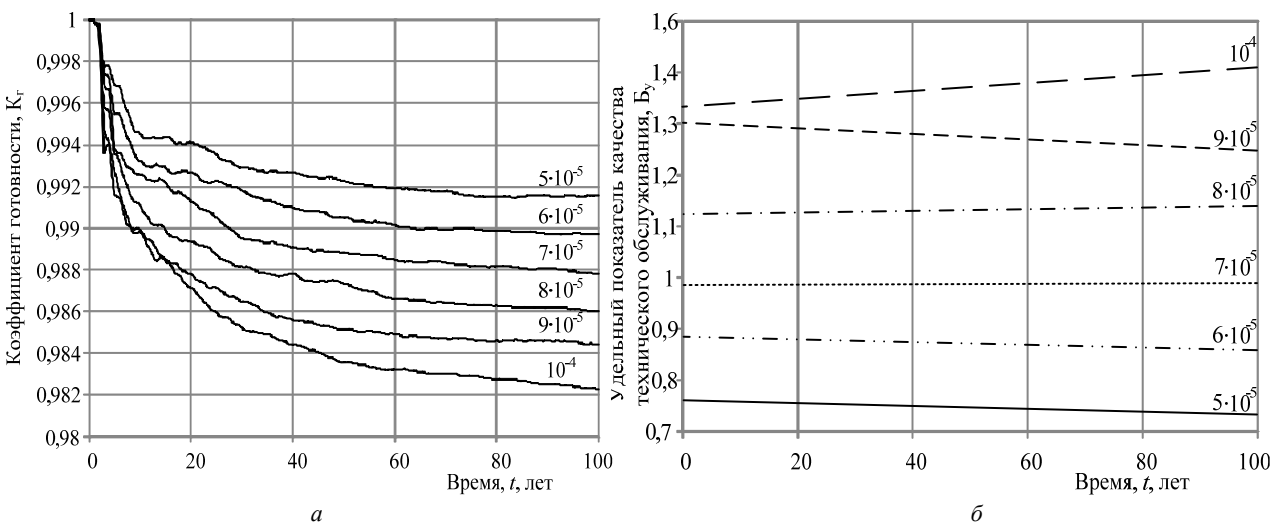


Рис. 3. Экспериментальный график зависимости оценок коэффициента готовности K_T (а) удельного показателя качества ТО B_y (б) от времени t и интенсивности отказов λ

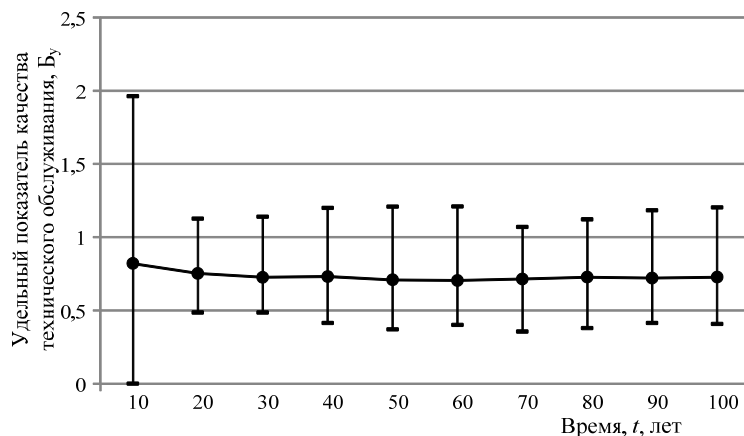


Рис. 4. Изменение среднего значения B_y и его максимальной и минимальной величины для интенсивности отказов $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч

На рис. 4 представлены график среднего значения удельного показателя качества B_y , а также его максимальные и минимальные значения за соответствующий период времени для интенсивности отказов $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Согласно положению «О показателе качества технического обслуживания средств связи», можно утверждать, что при заданных параметрах модели достигается наивысшая категория качества «Отлично», так как во всех точках максимальное значение не превышает порог в 14,5 штрафных балла.

Заключение

Анализ качества эксплуатации оборудования, участвующего в организации ответственных технологических процессов в промышленности и на транспорте, остается актуальной задачей. Применение современных программных средств, позволяющих автоматизировать процесс расчета показателей качества, обладает неоспоримым преимуществом, заключающимся в оперативном получении результатов компьютерного моделирования в сравнении с натурными испытаниями и (или) опытными данными эксплуатации. Однако это требует разработки адекватных математических моделей, чья точность сопоставима с результатами расчетов на основе реальных опытных данных.

В данной работе предложена имитационная модель процесса эксплуатации устройств железнодорожной электросвязи, предназначенная для оценки удельного показателя качества технического обслуживания средств связи и коэффициента готовности как показателя качества процесса эксплуатации в целом. В основу модели положен принцип дискретно-событийного моделирования, что облегчает её реализацию в среде AnyLogic с помощью встроенных инструментов. Разработанная модель учитывает возникновение внезапных, скрытых и ложных отказов устройств, влияние готовности комплектов ЗИП, ошибочных действий обслуживающего персонала, а также периодичности и продолжительности ТО и ремонта.

С помощью предлагаемой модели появляется возможность проведения компьютерного экспери-

мента с целью анализа влияния входных параметров на коэффициент готовности и удельный показатель качества технического обслуживания. Таким образом, разработанная модель может выступать в качестве инструмента поддержки принятия решений, например, при совершенствовании системы технического обслуживания уже используемого и (или) вновь внедряемого оборудования электросвязи.

В дальнейшем планируется усовершенствование разработанной модели с целью учета постепенных отказов компонентов оборудования железнодорожной электросвязи, а также изменяемой в процессе эксплуатации периодичности технического обслуживания.

Литература

1. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте: учеб. / Г.В. Горелов, А.Ф. Фомин, А.А. Волков и др. — М.: УМЦ ЖДТ, 2013. — 532 с.
2. Сапожников Вл.В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие / Вл.В. Сапожников и др.; под ред. Вл.В. Сапожникова. — М.: УМЦ ЖДТ, 2017. — 318 с.
3. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту объектов железнодорожной электросвязи ОАО «Российские железные дороги», от 26 октября 2017 г. № 2185р [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=708469#03937885506746581>, свободный (дата обращения: 07.10.2018).
4. Богданов А.А. Оценка качества эксплуатации и технического обслуживания в региональном центре связи с помощью инструмента Anylogic 7 / А.А. Богданов, А.А. Любченко // Россия молодая: передовые технологии — в промышленность. — 2017. — №2. — С. 3–8.
5. Держо Г.Г. Количественная оценка вклада систем связи в безопасность технологических процессов на железнодорожном транспорте. — М.: УМЦ ЖДТ, 2007. — 130 с.
6. Шерстнева О.Г. Расчет вероятностей ошибок контроля в процессе технического обслуживания цифровых систем коммутации // Инфокоммуникационные технологии. — 2007. — Т. 5, № 2. — С. 38–41.
7. Полетаев В.П. Определение оптимальной периодичности профилактики скрытых отказов / В.П. Полетаев, Д.А. Богданов // Информационные технологии в проектировании и производстве. — 2009. — № 3. — С. 9–13.

8. Полетаев В.П. Применение автоматизированного комплекса для оценки состояния технических систем со скрытыми отказами / В.П. Полетаев, Д.А. Богданов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3(15). – С. 80–84. doi: 10.21685/2307-4205-2016-3-12
9. Реутов В.Г. Проблемы оценки показателей надежности сложных систем / В.Г. Реутов, Д.А. Шеломанов // Приборы и системы. управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 7. – С. 47–52.
10. Острейковский В.А. Теория надежности: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.
11. Шибанов Г.П. Количественная оценка деятельности человека в системах человек–техника. – М.: Машиностроение, 1983. – 263 с.
12. Черкесов Г.Н. Оценка надежности с учетом ЗИП: учеб. пособие / Г.Н. Черкесов – СПб.: БВХ-Петербург, 2012. – 480 с.
13. Жданов В.В. Проблемы расчета показателей достаточности и оптимизации запасов в системах ЗИП / В.В. Жданов, Д.К. Авдеев, А.Н. Тихменев // Надежность. – 2011. – № 3(38). – С. 53–60.
14. ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. – М.: Стандартинформ, 2009. – 19 с.
15. Научно-методические основы управления надежностью и безопасностью эксплуатации сетей связи железнодорожного транспорта / В.К. Котов, В.Р. Антонец, Г.П. Лабеецкая, В.В. Шмытинский. – М.: УМЦ ЖДТ, 2012. – 193 с.
16. Емельянов В.Е. Оценка качества технического обслуживания средств РТОП и ЭС / В.Е. Емельянов, С.Н. Смородский // Научный вестник Моск. гос. техн. ун-та гражданской авиации. – 2015. – № 219(9). – С. 41–45.
17. Модель для расчета показателей качества функционирования системы технического обслуживания и ремонта сети связи / В.Л. Витюк, В.Л. Гузенко, Е.А. Миронов и др. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 5-3. – С. 493–498.
18. Коваленко В.Н. Контроль качества и надежности технического обслуживания и ремонтов / В.Н. Коваленко, Д.Ю. Зайцев, Д.Г. Неволин // Транспорт Урала. – 2016. – № 3(50). – С. 43–47. doi: 10.20291/1815-9400-2016-3-43-47
19. Якубович А.Н. Эффективный алгоритм численной реализации случайных величин в задачах статистического моделирования надежности технических систем / А.Н. Якубович, И.А. Якубович // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2016. – № 8. – С. 84–89.
20. Якубович А.Н. Определение надежности автотранспортных систем и их элементов методами математического моделирования / А.Н. Якубович, И.А. Якубович // Грузовик. – 2016. – № 7. – С. 39–44.
21. Якубович А.Н. Оценка надежности автотранспортных систем методами статистического моделирования (аналитический обзор) / А.Н. Якубович, И.А. Якубович, В.И. Рассоха // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2016. – № 1. – С. 89–94.
22. Тихменев А.Н. Прогнозирование надежности структурно-сложных радиоэлектронных средств методами имитационного моделирования / А.Н. Тихменев, В.В. Жданов // Качество. Инновации. Образование. – 2013. – № 3. – С. 50–56.
23. Чернов А.В. Оценка надежности программного обеспечения методами дискретно-событийного моделирования / А.В. Чернов, А.Н. Гуда, С.В. Чубейко, М.А. Бугакова // Программные продукты и системы. – 2015. – № 4. – С. 158–165. doi: 10.15827/0236-235X.112.158-165
24. Максимей И.В. Имитационное моделирование вероятностных характеристик функционирования железнодорожной сети / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, П.В. Гируц, Е.А. Ерофеева // Математические машины и системы. – 2008. – № 4. – С. 147–153.
25. Алексеев С.И. Имитационно-анимационное моделирование основных технологических процессов Мурманского транспортного узла / С.И. Алексеев, В.В. Береженой, Р.И. Сорока // Евразийское пространство: приоритеты социально-экономического развития. – 2011. – С. 28–36.
26. Любченко А.А. Дискретно-событийная модель железнодорожного узла в среде AnyLogic / А.А. Любченко, С.В. Бартош, В.А. Смирнов, Р. А. Castillo // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – Т. 4, № 1. – С. 87–92.
27. Якимов И.М. Моделирование сложных систем в имитационной среде AnyLogic / И.М. Якимов, А.П. Кирпичников, В.В. Мокшин // Вестник Казан. техн. ун-та. – 2014. – Т. 17, № 13. – С. 352–357.
28. Рахмангулов А.Н. Особенности построения имитационной модели технологии работы железнодорожной станции в системе AnyLogic / А.Н. Рахмангулов, П.Н. Мишкurov // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании. – 2012. – Т. 2, № 4. – С. 7–13.
29. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БВХ-Петербург, 2008. – 704 с.
30. Об утверждении методики определения объема работ региональных центров связи (для исчисления производительности труда работников, занятых на перевозках) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://jd-doc.ru/2012/mart-2012/1888-ot-7-marta-2012-g-n-478r>, свободный (дата обращения: 11.06.2018).
31. Финаев В.И. Аналитические и имитационные модели: учеб. пособие / В.И. Финаев, Е.Н. Павленко, Е.В. Заргарян. – Таганрог: Изд-во Технол. ин-та ЮФУ, 2007. – 310 с.
32. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 420 с.

Любченко Александр Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. телекоммуникационных, радиотехнических систем и сетей (ТРСиС) Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)
Маркса пр-т, д. 35, г. Омск, Россия, 644046
<http://orcid.org/0000-0002-2768-484X>
Тел.: +7-960-998-97-04
Эл. почта: allyubchenko@gmail.com

Копытов Евгений Юрьевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТРСиС ОмГУПС
Маркса пр-т, д. 35, г. Омск, Россия, 644046
Тел.: (381-2) 31-16-72
Эл. почта: jenya87@list.ru

Богданов Александр Александрович

Студент каф. ТРСиС ОмГУПС
Маркса пр-т, д. 35, г. Омск, Россия, 644046
Тел.: +7-950-338-99-11
Эл. почта: Alex-b0g@yandex.ru

Lyubchenko A.A., Kopytov E.Y., Bogdanov A.A.

Statistical modeling of quality measures of operation and preventive maintenance of railway telecommunication equipment in AnyLogic

Telecommunication equipment is a functional subsystem of railway transport which safety and efficiency are totally dependent on the reliable operation of utilized communication devices. Preventive maintenance is one of the most popular methods of ensuring the required reliability level of the technological equipment on railways. The efficiency assessment of maintenance procedures implementation is done using the approved quality indicator of preventive maintenance. Whereas the availability coefficient is used for the quality estimation of the whole exploitation process. Generally, the calculation of the mentioned measures is performed on the basis of the statistical data about occurred failures. This method is characterized by significant advantages as well as obvious disadvantages in case of the lack or constrained obtaining of empirical data. Modern computer technologies allow automating and simplifying the estimation of the target quality indicators. However, it requires the development of a proper mathematical support for such analysis. In the paper, we propose a simulation model of the operational process of railway telecommunication equipment with the opportunity of the estimation of the availability coefficient and the quality indicator of preventive maintenance in automated mode. The model takes into account sudden, fictitious and latent failures, impact of spare parts availability and erroneous actions of service staff during maintenance, as well as periodicity and length of maintenance and repair for quality measures estimation. The model is built using the discrete-event approach with AnyLogic.

Keywords: railway telecommunications, quality, availability, AnyLogic.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-98-108

References

1. Gorelov G.V., Fomin A.F., Volkov A.A., Kotov V.K., Romashkova O.N. *Teoriya peredachi signalov na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik* [Theory of signal transmission in rail transport: textbook]. Moscow, UMC GDT, 2013. 532 p.
2. Sapognikov V.I. et al. *Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi* [Reliability of railway systems of automation, telemechanic and communication]. Moscow, UMC GDT, 2017. 318 p.
3. Repair and maintenance instructions for railway telecommunication systems of OAO «RZD», 26/10/2017 № 2185 p. [Free online resource]. – Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=708469#03937885506746581>, (accessed November 07, 2018).
4. Bogdanov A.A., Lyubchenko A.A. Assessment of operation and maintenance quality in regional communication centre using AnyLogic 7. *Rossiya molodaya: peredovye tehnologii – v promyshlennost'*, 2017, no. 2, pp. 3–8 (in Russ.).
5. Derzho G.G. *Kolichestvennaya ocenka vklada sistem svyazi v bezopasnost' tekhnologicheskikh processov na zheleznodorozhnom transporte: Monografiya* [Quantitative analysis of contribution of telecommunications on technological processes safety in rail transport: monograph]. Moscow, UMC GDT, 2007. 130 p.
6. Sherstneva O.G. Probability calculation of control errors during maintenance of digital transmission switches. *Info-comm technologies*, 2007, no. 2, iss. 5, pp. 38–41 (in Russ.).

7. Poletaev V.P., Bogdanov D.A. Determination of the preventive maintenance optimal frequency of hidden failures. *Information technology of CAD/CAM/CAE*, 2009, no. 3, pp. 9–13 (in Russ).

8. Poletaev V.P., Bogdanov D.A. Application of automated complex for the state estimation of technical systems with latent failures. *Reliability and quality of complex system*, 2016, no. 3(15), pp. 80–84 (in Russ). DOI: 10.21685/2307-4205-2016-3-12.

9. Reutov V.G., Shelomanov V.G. Reliability estimation problems of complex systems. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2016, no. 7, pp. 47–52 (in Russ).

10. Ostrejkovskij V.A. *Teoriya nadezhnosti: uchebnik dlya vuzov* [Reliability theory: textbook for higher education institutions]. Moscow, Vysshaya shkola publishers, 2005. 463 p.

11. Shibanov G.P. *Kolichestvennaya ocenka deyatel'nosti cheloveka v sistemah chelovek-tekhnika* [Human activity quantitative estimation in human-machine systems]. Moscow, Mashinostroenie, 2005. 463 p.

12. Cherkesov G.N. *Ocenka nadezhnosti s uchetom ZIP* [Reliability calculation with respect to spare parts]. Saint Petersburg, BVH-Peterburg, 2012. 480 p.

13. Gdanov V.V., Avdeev D.K., Tihmenev A.N. Problems of sufficiency and optimization indices calculation of spare parts supply. *Reliability*, 2011, no. 3, iss. 38, pp. 53–60 (in Russ.).

14. GOST R 53111–2008. *Ustojchivost' funkcionirovaniya seti svyazi obshchego pol'zovaniya. Trebovaniya i metody proverki* [Operation stability of public communication networks. Requirements and test procedures]. Moscow, Standartinform, 2009. 19 p.

15. Kotov V.K., Antonec V.R., Labeckaya G.P., SHmytinskij V.V. *Nauchno-metodicheskie osnovy upravleniya nadezhnost'yu i bezopasnost'yu ehkspluatatsii setej svyazi zheleznodorozhnogo transporta: monografiya* [Scientific methodical basics of reliability and safety control of the telecommunication networks operation in railway transport: monograph]. Moscow, UMC GDT, 2012. 193 p.

16. Emelyanov V.E., Smorodskiy S.N. Quality assessment maintenance of FRTS and ES. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2015, no. 219(9), pp. 41–45 (in Russ.).

17. Vityuk V.L., Guzenko V.L., Mironov E.A., Sevast'yanov D.A., Shestopalova O.L. Model for calculating parameters of functioning quality of repair and maintenance of communications network. *Fundamental research*, 2016, no. 5-3, pp. 493–498 (in Russ).

18. Kovalenko V.N., Zaytcev D.Y., Nevolin D. G. Quality and reliability control for maintenance and repair. *Transport Urala*, 2016, no. 3(50), pp. 43–47 (In Russ.). DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-43-47

19. Yakubovich A.N., Yakubovich I.A. Efficient algorithm for numerical implementation of random variables in statistical modeling of technical systems reliability. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, 2016, no. 8, pp. 84–89 (in Russ.).

20. Yakubovich A.N., Yakubovich I.A. The determination of the reliability of transport systems and their elements using mathematical modelling. *Gruzovik*, 2016, no. 7, pp. 39–44 (in Russ.).

21. Yakubovich A.N., Yakubovich I.A., Rassokha V.I. Reliability evaluation of transport systems by statistical modeling methods (analytical review). *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, 2016, no. 1, pp. 89–94 (in Russ.).

22. Tikhmenev A.N., Zhadnov V.V. Reliability prediction structural-difficult electronic devices by methods of imitating

modelling. *Quality. Innovation. Education*, 2013, no. 3, pp. 50–56 (in Russ.).

23. Chernov A.V., Guda A.N., Chubeyko S.V., Butakova M.A. Software reliability evaluation by discrete-event simulation methods. *Programmye Produkty i Sistemy*, 2015, no. 4, pp. 158–165 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.112.158-165.

24. Maksimey I.V., Sukach E.I., Giruts P.V., Erofeeva E.A. Simulation modelling of probabilistic characteristic of railway network operation. *Mathematical machines and systems*, 2008, no. 4, pp. 147–153 (in Russ.).

25. Alekseev S.I., Berezhnoy V.V., Soroka R.I. Imitacionno-animacionnoe modelirovanie osnovnyh tehnologicheskikh processov murmanskogo transportnogo uzla [Imitated-animated simulation of the basic technological processes the Murmansk transport hub]. *Evrazijskoe prostranstvo: priority social'no-jekonomicheskogo razvitija. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Eurasian area: priorities of socio-economic development. Proc. of the international conference]*. Moscow, MGIU Publ., 2011, vol. I, pp. 28–36.

26. Lyubchenko A.A., Bartosh S.V., Smirnov V.A., Castillo P.Á. Discrete-event model of railway junction in AnyLogic. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 87–92 (in Russ.).

27. Yakimov I.M., Kirpichnikov A.P., Mokshin V.V. Modelirovanie slozhnyh sistem v imitacionnoj srede AnyLogic. *Herald of Kazan Technological University*. 2014, vol. 17, no. 13, pp. 352–357 (in Russ.).

28. Rakhmangulov A.N., Mishkurov P.N. Special aspects of railroad station working method simulation model development within AnyLogic system. *Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education*. 2012, no. 4, iss. 2, pp. 7–13 (in Russ.).

29. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Basics of reliability theory]. Saint-Petersburg: BVH-Peterburg, 2008. 704 p.

30. About approval of the procedure of effort estimation of regional communication centers (for the calculus of labor

efficiency of the employees, occupied in transportation) [Free online resource]. – Available at: <https://jd-doc.ru/2012/mart-2012/1888-ot-7-marta-2012-g-n-478r> (accessed June 11, 2018).

31. Finaev V.I., Pavlenko E.N., Zargaryan E.V. *Analiticheskie i imitacionnye modeli: uchebnoe posobie* [Analytical and simulation models: tutorial]. Taganrog, Publisher of Technological institute YuFU, 2007. 310 p.

32. Shennon R. *Imitacionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka* [Systems simulation: the art and science]. Moscow, Mir, 1978. 420 p.

Alexander A. Lyubchenko

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Department of Telecommunications, Radio System
and Networks, Omsk State Transport University (OSTU)
35, Marx pr., Omsk, Russia, 644046
<http://orcid.org/0000-0002-2768-484X>
Phone: +7-960-998-97-04
Email: allyubchenko@gmail.com

Evgeny Y. Kopytov

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Department of Telecommunications, Radio System
and Networks, Omsk State Transport University (OSTU)
35, Marx pr., Omsk, Russia, 644046
Phone: (381-2) 31-16-72
Email: jenya87@list.ru

Alexander A. Bogdanov

Student, Department of Telecommunications, Radio System
and Networks, Omsk State Transport University (OSTU)
35, Marx pr., Omsk, Russia, 644046
Phone: +7-950-338-99-11
Email: Alex-b0g@yandex.ru

УДК 519.688:622.276

В.Л. Сергеев, Т.Х.Ф. Нгуен, К.Д. Ву

Модели и алгоритмы идентификации начального участка забойного давления в адаптивном методе детерминированных моментов давлений

Решается задача определения параметров и типа нефтяных и газовых пластов по результатам газогидродинамических исследований скважин на неустановившихся режимах фильтрации с использованием адаптивного метода детерминированных моментов давлений с идентификацией начального участка кривой восстановления забойного давления. Приводятся примеры решения задачи идентификации и интерпретации кривой восстановления давления нефтяных и газовых скважин по промышленным данным.

Ключевые слова: адаптация, идентификация, оптимизация, газогидродинамические исследования скважин, интегрированные системы моделей, кривая восстановления давления, априорная информация, детерминированные моменты давлений.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-109-115

Перспективным направлением мониторинга разработки месторождений, идентификации и управления процессами нефтегазодобычи являются современные адаптивные технологии газогидродинамических исследований скважин (ГГДИС), позволяющие определять фильтрационные параметры нефтяных и газовых залежей в процессе проведения исследований. Адаптивные технологии интерпретации ГГДИС существенно сокращают время простоя скважин по сравнению с традиционными графоаналитическими методами, которые требуют привлечения квалифицированных специалистов, что затрудняет их использование в системах оперативной обработки информации в режиме реального времени [1–5].

Для определения фильтрационных параметров и типа пластовой системы в процессе проведения газогидродинамических исследований по кривой восстановления давления (КВД) используется адаптивный метод детерминированных моментов давлений (ДМД), который основывается на вычислении интегралов вида [5–7]

$$\mu_k(t_n, T) = \mu_k(t_n) + \hat{\mu}_k(T) = \int_{t_0}^{t_n} (P_{пл}(t) - P_3(t)) t^k dt + \int_{t_n}^T (P_{пл}(t) - \hat{P}_3(t_n + \tau)) (t_n + \tau)^k d\tau, \quad k=0, 1, 2, \quad (1)$$

где $\mu_k(t_n), \hat{\mu}_k(T)$ – детерминированные моменты давлений для текущего момента времени t_n и момента времени восстановления забойного давления до пластового T ; $P_{пл}(t), P_3(t)$ – значения пластового давления на контуре питания скважины и забойного; $\hat{P}_3(t_n + \tau)$ – прогнозные значения забойного давления в момент времени $t_n + \tau$.

Отметим, что адаптивный метод ДМД позволяет решать задачи параметрической и структурной идентификации по определению параметров пласта (гидропроводность, пьезопроводность, пластовое давление) и тип пласта (однородно-пористый, неод-

нородный пласт с ухудшенной проницаемостью призабойной зоны, трещиновато-пористый) в процессе проведения гидродинамических исследований в режиме реального времени [5].

Однако при обработке результатов ГГДИС возникает проблема выбора модели начального участка забойного давления, что существенно влияет на точность определения пластового давления и прогноза забойного давления (1) и соответственно на точность определения фильтрационных параметров и типа пласта на коротких недовосстановленных КВД [7].

В этой связи, основываясь на результатах работы [8], предлагаются модели и алгоритмы определения параметров и типа нефтяных и газовых пластов адаптивным методом ДМД в условиях неопределенности модели начального участка забойного давления.

Модели и алгоритмы идентификации начального участка КВД в адаптивном методе ДМД

В основе адаптивного метода ДМД в условиях неопределенности модели начального участка КВД использованы интегрированные системы моделей (ИСМ) забойного давления с переменными параметрами [4, 8]

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta P_{3,n} &= P_{3,n}^* - P_3^*(t_0) = (q_0^* f_c(a_n, t_n)) \times \\ &\times \left(\frac{1}{4\pi\sigma_n} \lg \left(\frac{2,25\chi_n t_n}{r_{пр,n}^2} \right) \right) + \xi_n, \quad (2) \\ h_{к,n} \bar{\sigma}_n &= \sigma_n + \eta_n, n = \overline{1, n_k}; \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta P_{3,n}^2 &= P_{3,n}^{2*} - P_3^{2*}(t_0) = (q_0^* f_c(a_n, t_n)) \times \\ &\times \left(\frac{4,23 T_{пл} z P_{ст}}{T_{ст} \sigma_n} \lg \left(\frac{2,25\chi_n t_n}{r_{пр,n}^2} \right) \right) + \xi_n, \quad (3) \\ h_{к,n} \bar{\sigma}_n &= \sigma_n + \eta_n, n = \overline{1, n_k}, \end{aligned} \right.$$

где (2) – интегрированная система моделей КВД нефтяного и соответственно газового пласта (3) с

учетом дополнительной априорной информации о гидропроводности $\bar{\sigma}_n$; $h_{k,n}$ – параметр для корректировки $\bar{\sigma}_n$; $P_{3,n}^*$ – измеренные значения забойного давления в моменты времени t_n ; $P_3^*(t_0)$ – начальное значение забойного давления после остановки скважины t_0 ; χ_n – пьезопроводность пласта; $r_{пр,n}$ – приведенный радиус скважины; q_0^* – дебит до остановки скважины; $T_{пл}, T_{ст}$ – пластовая и стандартная температура; z – коэффициент сверхсжимаемости газа; $P_{ст}$ – стандартное давление; $f_c(a_n, t_n)$ – функция с переменными параметрами, позволяющая учитывать начальный участок КВД.

Особенность (2), (3) заключается в том, что в модели начального участка КВД $f_c(a_n, t_n)$ параметры a_n являются неизвестными функциями времени и определяются совместно с параметрами пласта σ_n, χ_n и временем завершения газогидродинамических исследований t_k в процессе их проведения.

Примером функции $f_c(a_n, t_n) \rightarrow 1$ при $t_n \rightarrow \infty$ является зависимость

$$f_c(a_n, t_n) = 1 - \exp(-a_n t_n). \quad (4)$$

Для решения задачи идентификации интегрированных систем моделей забойного давления (2), (3) будем использовать комбинированные показатели качества вида [3, 8, 9]

$$\Phi(\mathbf{a}_n, \mathbf{\beta}_n) = J_0(\mathbf{a}_n, h_{3,n}) + J_a(\mathbf{a}_n, h_{р,n}, h_{к,n}),$$

где

$$J_0(\mathbf{a}_n, h_{3,n}) = \sum_{i=1}^{n-1} w((t_n - t_{n-i})/h_{3,n}) \psi_0(\xi_i(\mathbf{a}_n)),$$

$$J_a(\mathbf{a}_n, h_{р,n}, h_{к,n}) = h_{р,n} \psi_a(\eta_n(\mathbf{a}_n, h_{к,n}))$$

есть частные критерии качества моделей КВД и дополнительных априорных данных о гидропроводности пласта, известных к моменту времени t_n ; $w((t_n - t_{n-i})/h_{3,n}) = \exp(-(t_n - t_{n-i})/h_{3,n})$ – весовая функция с параметром забывания $h_{3,n}$ для обеспечения процесса адаптивной идентификации; $\mathbf{\beta}_n = (h_{3,n}, h_{р,n}, h_{к,n})$ – вектор управляющих параметров забывания $h_{3,n}$, регуляризации $h_{р,n}$ и корректировки; $h_{к,n}$ – квадратичные функции.

Оценки параметров модели забойного давления (2), (3) $\mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n) = (\sigma_n^*(\mathbf{\beta}_n), \chi_n^*(\mathbf{\beta}_n), a_n^*(\mathbf{\beta}_n))$ определяем путем решения оптимизационных задач [8, 9]:

$$\mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n) = \arg \min_{\mathbf{a}_n} \Phi(\mathbf{a}_n, \mathbf{\beta}_n), \quad (5)$$

$$\mathbf{\beta}_n^* = \arg \min_{\mathbf{\beta}_n} J_0(\mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n)), \quad (6)$$

где $\mathbf{\beta}_n^* = (h_{3,n}^*, h_{р,n}^*, h_{к,n}^*)$ – оптимальные оценки вектора управляющих параметров.

Полученные путем решения оптимизационных задач (5), (6) оценки параметров модели КВД

$\mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n)$ и управляющих параметров $\mathbf{\beta}_n^*$ могут быть использованы для определения детерминированных моментов давлений (1). Так, например, для КВД нефтяного пласта (2) при использовании метода прямоугольников для вычисления интегралов (1) имеют место следующие оценки детерминированных моментов давлений:

$$\hat{\mu}_k(t_n, T, \mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)) = \mu_k^*(t_n, \mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)) + \hat{\mu}_k(T, \mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)), \quad (7)$$

$$\mu_k^*(t_n, \mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)) = \sum_{n=n_0}^{n_k} (P_{пл,n}^*(\mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)) - P_{3,n}^*) t_n^k \Delta t_n,$$

$$\hat{\mu}_k(T, \mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)) =$$

$$= \sum_{n=n_k+1}^{n(T)} (P_{пл,n}^*(\mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)) - P_{3,n}^*(\Delta t_{n+\tau}, \mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*))(t_{n+\tau})^k \Delta t_n,$$

где $P_{пл,n}^*(\mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*))$ – оценки пластового давления, а $\hat{P}_{3,n}(t_{n+\tau}, \mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*))$ – прогнозные значения забойного давления;

$$P_{пл,n}^*(\mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)) = P_3^*(t_0) + (q_0^* f_c(a_n^*(\mathbf{\beta}_n^*), t_n)) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{4\pi\sigma_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)} \lg \left(\frac{2,25\chi_n^*(\mathbf{\beta}_n^*) \bar{T}}{r_{пр,n}^2} \right) \right), \quad (8)$$

$$\hat{P}_{3,n}(t_{n+\tau}, \mathbf{a}_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)) = P_3^*(t_0) + (q_0^* f_c(a_n^*(\mathbf{\beta}_n^*), (t_{n+\tau}))) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{4\pi\sigma_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)} \lg \left(\frac{2,25\chi_n^*(\mathbf{\beta}_n^*)}{r_{пр,n}^2} (t_{n+\tau}) \right) \right); \quad (9)$$

$n_k = n_0, n_0 + 1, n_0 + 2, \dots$ – объем данных забойного давления в момент времени t_k ; n_0 – объем данных забойного давления начального участка КВД (рис. 1, 2, линия 2); $n(\bar{T})$ – объем данных забойного давления к моменту времени восстановления забойного давления до пластового \bar{T} (табл. 1); $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$; $\tau = 0, 1, 2, \dots, n(T) - n_k$. Аналогичные оценки детерминированных моментов давлений, пластового давления и прогнозные значения забойного давления (7)–(9) имеют место и для КВД газовой скважины (3).

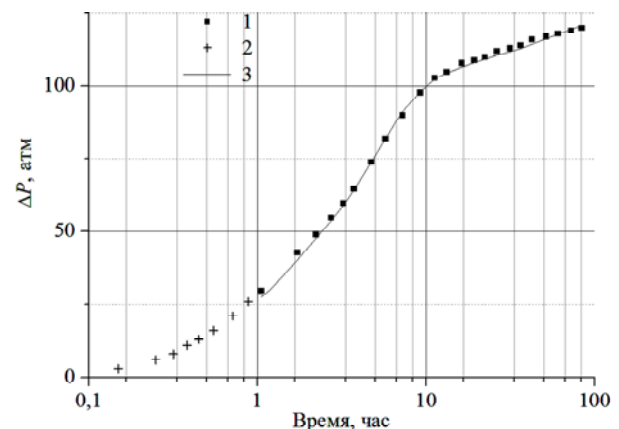


Рис. 1. Фактические (линии 1, 2) и восстановленные (линия 3) значения разности забойного давления для нефтяной скважины № 1

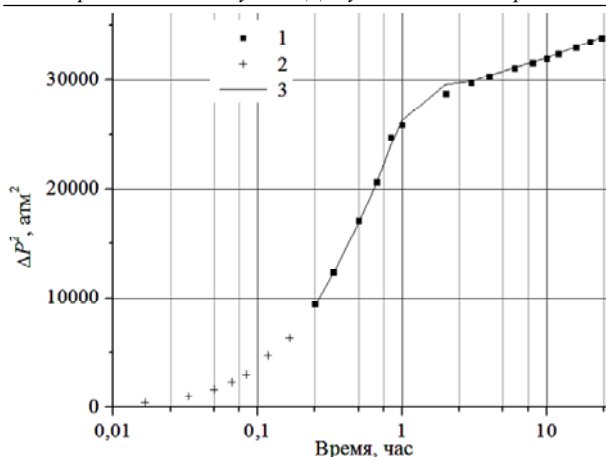


Рис. 2. Фактические (линии 1, 2) и восстановленные (линия 3) значения разности квадрата забойного давления для газовой скважины № 2

Таблица 1
Исходные данные нефтяной и газовой скважины

Исходные данные	Скважины	
	нефтяная	газовая
1. Эффективная мощность h , м	5,9	158,8
2. Радиус скважины r_c , м	0,108	0,108
3. Радиус контура питания скважины R_k , м	92	650
4. Температура при стандартном условии $T_{ст}$ (+20 °C) К	293	293
5. Стандартное давление $R_{ст}$, атм	1,033	1,033
6. Пористость m	0,19	0,135
7. Коэффициент сверхсжимаемости газа при пластовых условиях z , 1/атм		0,862
8. Пластовая температура $T_{пл}$, К	298	375
9. Динамическая вязкость μ , сП	0,901	0,02
10. Объем данных начального участка для обработки КВД m_0	8	7
11. Экспертная оценка времени восстановления забойного давления до пластового \bar{T} , ч	120	72
12. Дебит скважины до остановки q_0^* , м³/сут	214,5	204,7×10³

Результаты идентификации КВД адаптивным методом ДМД

Результаты исследований моделей и алгоритмов идентификации и интерпретации ГГДИС по КВД нефтяного и газового месторождений Тюменской области адаптивным методом детерминированных моментов давлений приведены на рис. 3–8 и в табл. 2, 3.

Исходные данные для результатов интерпретации КВД нефтяной и газовой скважины, приведены в табл. 1 и на рис. 1, 2.

На рис. 1, 2 приведены фактические (линии 1, 2) и восстановленные (линия 3) значения разности забойного давления в логарифмических координатах ($\Delta P_3 = f[\lg(t)]$) для нефтяной скважины № 1 и разности квадрата забойного давления в логарифмических координатах ($\Delta P_3^2 = f[\lg(t)]$) для газовой скважины № 2.

Начальный участок КВД изображен на рис. 1, 2 линией 2.

На рис. 3, 4 для нефтяной скважины № 1 и газовой скважины № 2 приведены оценки диагностического коэффициента $d^*(\alpha_n^*(\beta_n^*))$, полученные адаптивным методом ДМД без идентификации начального участка КВД (линия 1) при $f_c(a_n, t_n)=1$ (4) и адаптивным методом ДМД с идентификацией начального участка КВД (линия 2).

$$d^*(\alpha_n^*(\beta_n^*)) = \frac{\hat{\mu}_0^*(\alpha_n^*(\beta_n^*)) \cdot \hat{\mu}_2^*(\alpha_n^*(\beta_n^*))}{(\hat{\mu}_1^*(\alpha_n^*(\beta_n^*)))^2}, \quad (10)$$

где $\hat{\mu}_0^*(\alpha_n^*(\beta_n^*))$, $\hat{\mu}_1^*(\alpha_n^*(\beta_n^*))$, $\hat{\mu}_2^*(\alpha_n^*(\beta_n^*))$ – оценки детерминированных моментов давлений (7). Отметим, что диагностический коэффициент $d^*(\alpha_n^*(\beta_n^*))$ находится в интервале 1,9–2,1 (см. рис. 3, 4, линия 2). Это означает, что нефтяной и газовый пласты являются однородно-пористым [6].

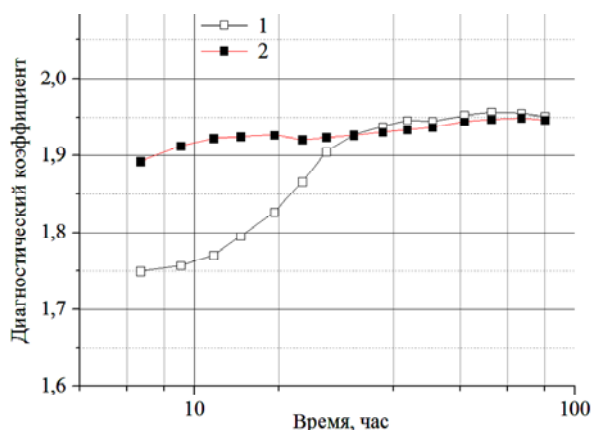


Рис. 3. Оценки диагностического коэффициента для нефтяной скважины № 1

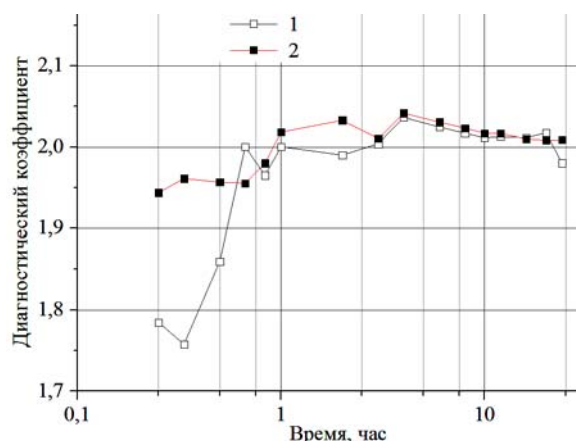


Рис. 4. Оценки диагностического коэффициента для газовой скважины № 2

На рис. 5–8 приведены оценки гидропроводности и пьезопроводности, полученные адаптивным методом ДМД без идентификации начального участка КВД (линия 1) и адаптивным методом ДМД с идентификацией начального участка КВД (линия 2) для нефтяной скважины $\sigma_n^*(\alpha_n^*(\beta_n^*))$, $\chi_n^*(\alpha_n^*(\beta_n^*))$ (10)

и газовой скважины $\sigma_n^*(\beta_n^*), \chi_n^*(\beta_n^*)$ (11) соответственно.

$$\sigma_n^*(\beta_n^*) = \frac{0,8q_0 \hat{\mu}_1^*(\alpha_n^*(\beta_n^*))}{\pi(\hat{\mu}_0^*(\alpha_n^*(\beta_n^*)))^2}, \quad (11)$$

$$\sigma_z^*(\beta_n^*) = \frac{1,6q_0 \hat{\mu}_1^*(\alpha_n^*(\beta_n^*)) P_{ст}}{\pi(\hat{\mu}_0^*(\alpha_n^*(\beta_n^*)))^2},$$

$$\chi_n^*(\beta_n^*) = \chi_\Gamma^*(\beta_n^*) = \frac{\hat{\mu}_0^*(\alpha_n^*(\beta_n^*)) R_k^2}{6,4 \hat{\mu}_1^*(\alpha_n^*(\beta_n^*))}, \quad (12)$$

где R_k – радиус контура питания скважины.

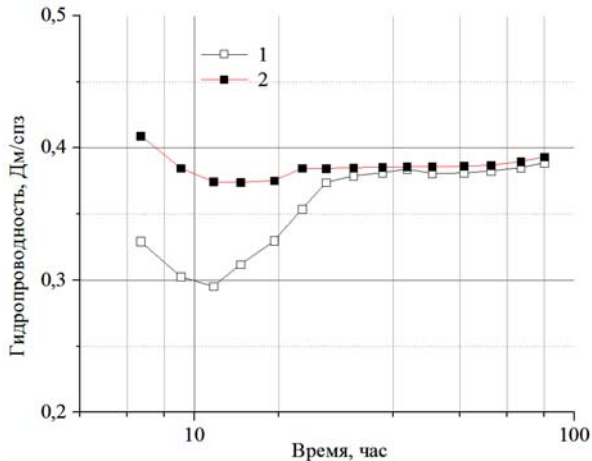


Рис. 5. Оценки гидропроводности для нефтяной скважины № 1

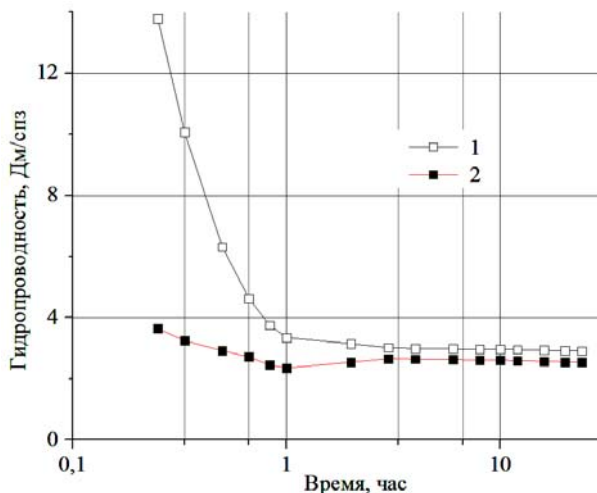


Рис. 6. Оценки гидропроводности для газовой скважины № 2

Для определения оценок параметров $\alpha_n^*(\beta_n^*)$ (5) моделей КВД (2), (3) в работе использован метод деформированного многогранника [13]. Определение оценок вектора управляющих параметров β_n^* (6) сводилось, по аналогии с [9], к последовательному решению трех оптимизационных задач по определению параметров забывания, регуляризации и корректировки методом дихотомии [14]. В качестве модели начального участка КВД для нефтяной и газовой скважины (2), (3) использована зависимость (4).

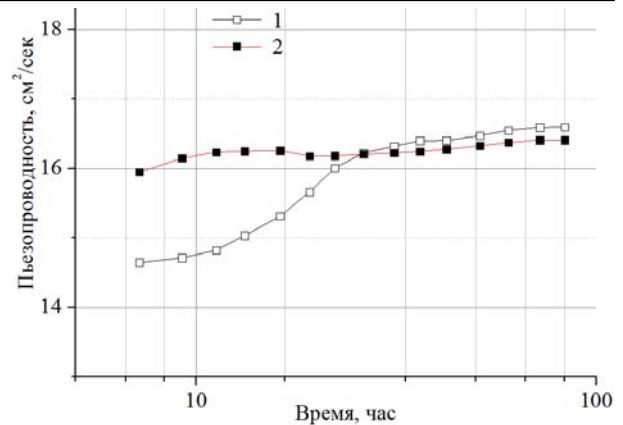


Рис. 7. Оценки пьезопроводности для нефтяной скважины № 1

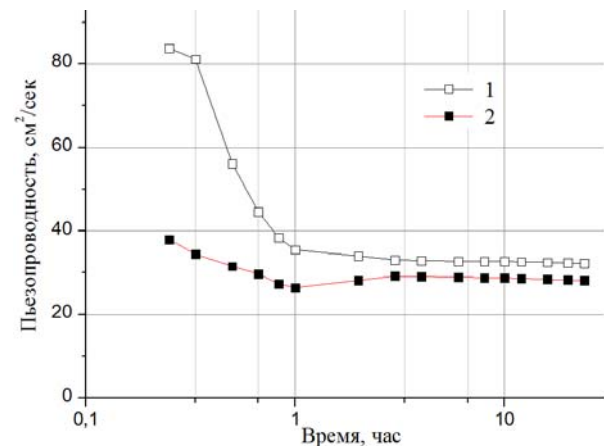


Рис. 8. Оценки пьезопроводности для газовой скважины № 2

В табл. 2, 3 приведены оценки параметров пласта, полученные в разные моменты времени регистрации КВД ($t_k = 1; 9; 22; 72$ ч) для нефтяной скважины № 1 и ($t_k = 0,6; 3; 10; 24$ ч) для газовой скважины № 2. Время завершения газогидродинамических исследований, требуемое для программного комплекса Saphir, составило 84 ч для нефтяной скважины (см. табл. 2) и 30 ч для газовой скважины (см. табл. 3). Моменты времени завершения газогидродинамических исследований t_k^* для адаптивного метода ДМД без идентификации начального участка КВД (АДМД без ИНУ КВД) и адаптивного метода ДМД с идентификацией начального участка КВД (АДМД с ИНУ КВД) определялись по формуле

$$t_k^* = \left| \frac{x^*(t_{k+1}) - x^*(t_k)}{x^*(t_k)} \right| \leq 0,05,$$

где $x^*(t_{k+1})$ – средние значения приведенных в табл. 2, 3 параметров (диагностического коэффициента и фильтрационных параметров пласта).

Анализ результатов, приведенных на рис. 3–8 и табл. 2, 3, показывает, что рассмотренные модели и алгоритмы адаптивного метода ДМД с идентификацией начального участка КВД позволяют значительно сократить время простоя скважин. Например, для

получения оценок гидропроводности, пьезопроводности и диагностического коэффициента (см. табл. 2, 3) при использовании программного комплекса Saphir требуется 84 и 30 ч простоя нефтяной и газовой скважины соответственно.

Таблица 2

Результаты интерпретации нефтяной скважины № 1

Метод	Время регистрации КВД t_k , ч	Диагностический коэффициент	Гидропроводность, Дм/спз	Пьезопроводность, см ² /с	Время завершения исследований t_k , ч
Saphir	84		0,38	16,9	84
АДМД с ИНУ КВД	1	1,86	0,41	15,62	9
	9	1,91	0,38	16,15	
	22	1,92	0,38	16,28	
АДМД без ИНУ КВД	72	1,95	0,39	16,21	22
	1	1,73	1,41	19,46	
	9	1,82	0,30	14,64	
	22	1,93	0,39	16,23	
	72	1,94	0,37	16,33	

Таблица 3

Результаты интерпретации газовой скважины № 2

Метод	Время регистрации КВД t_k , ч	Диагностический коэффициент	Гидропроводность, Дм/спз	Пьезопроводность, см ² /с	Время завершения исследований t_k , ч
Saphir	30		2,58	29,91	30
АДМД с ИНУ КВД	0,6	1,96	2,72	29,73	3
	3	2,01	2,66	29,19	
	10	2,02	2,61	28,78	
	24	2,01	2,55	28,41	
АДМД без ИНУ КВД	0,6	1,86	4,64	44,58	10
	3	2,00	3,02	33,09	
	10	2,01	2,86	31,61	
	24	1,99	2,81	31,23	

Для адаптивного метода ДМД без идентификации начального участка КВД требуется соответственно 22 ч для нефтяной и 10 ч для газовой скважины. При использовании предложенного в работе адаптивного метода ДМД с идентификацией начального участка КВД, достаточно порядка 9 ч простоя нефтяной и 3 ч простоя газовой скважины.

Выводы

Рассмотренные модели и алгоритмы идентификации начального участка кривой восстановления забойного давления в методе детерминированных моментов давлений при интерпретации результатов газогидродинамических исследований скважин позволяют:

- 1) решать задачи параметрической и структурной идентификации по определению фильтрационных параметров, пластового давления и типа нефтяных и газовых пластов в процессе проведения исследований;
- 2) учитывать эффект влияния ствола скважины в условиях неопределенности модели начального участка кривой восстановления забойного давления;

3) сократить время простоя скважин.

На примерах газогидродинамических исследований двух скважин нефтяного и газового месторождений показано, что предложенные в работе модели и алгоритмы позволяют обрабатывать короткие, в пределах 3–9 ч, кривые восстановления забойного давления.

Литература

1. Ипатов А.И. Современные технологии гидродинамических исследований скважин и их возрастающая роль в разработке месторождений углеводородов / А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, Д.Н. Гуляев // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 1. – С. 52–55.
2. Гаврилов К.С. Адаптивная интерпретация нестационарных гидродинамических исследований скважин в системе «пласт–скважина» методом интегрированных моделей / К.С. Гаврилов, В.Л. Сергеев // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 72–75.
3. Технология проектирования адаптивной системы идентификации и прогноза производственных процессов в условиях неопределенности / А.М. Кориков, В.Л. Сергеев, Д.В. Севостьянов, П.В. Сергеев, А.С. Аниканов // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 189–194.
4. Сергеев В.Л. Адаптивная интерпретация газодинамических исследований скважин с идентификацией начального участка кривой восстановления давления / В.Л. Сергеев, Е.В. Романова // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 1. – С. 111–117.
5. Сергеев В.Л. Интерпретация нестационарных гидродинамических исследований скважин адаптивным методом детерминированных моментов давлений / В.Л. Сергеев, А.С. Аниканов, П.А. Кемерова // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2011. – Т. 319, № 4. – С. 47–50.
6. Булгаков С.А. Повышение информативности исследования нефтяных скважин на основе метода ДМД / С.А. Булгаков, Б.А. Ольховская // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2011. – № 1. – С. 54–57.
7. Иктисанов В.А. Определение фильтрационных параметров пластов и реологических свойств дисперсных систем при разработке нефтяных месторождений. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2001. – 212 с
8. Сергеев В.Л. Адаптивная интерпретация гидродинамических исследований с учетом влияния ствола скважины / В.Л. Сергеев, К.Д. Ву // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 9. – С. 70–77.
9. Сергеев В.Л. К оптимизации адаптивных алгоритмов идентификации и интерпретации гидродинамических исследований с учетом влияния ствола скважины / В.Л. Сергеев, К.Д. Ву // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 98–102.
10. Басович И.Б. Выбор фильтрационных моделей по данным гидродинамических исследований скважин / И.Б. Басович, Б.С. Капцанов // Нефтяное хозяйство. – 1980. – № 3. – С. 44–47.
11. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2011. – 198 с.
12. Сергеев В.Л. Метод адаптивной идентификации гидродинамических исследований скважин с учетом априорной информации / В.Л. Сергеев, А.С. Аниканов // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2010. – Т. 317, № 5. – С. 50–52.

13. Koshel R.J. Enhancement of the downhill simplex method of optimization // *International Optical Design Conference*. – 2002. – Vol. 4832. – P. 270–282.

14. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.

15. Adaptive System for Analysis and Interpretation of Combined Well Test Data / V.L. Sergeev, T.H.P. Nguyen, A.I. Krainov, A.Yu. Gorchach // *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. – Moscow, 2017. – doi:10.2118/187761-MS. – URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-187761-MS>.

Сергеев Виктор Леонидович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-905-992-92-31
Эл. почта: SVL00@tpu.ru

Нгуен Тхак Хоай Фьонг

Аспирант отделения нефтегазового дела инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-880-11-61
Эл. почта: nguyenphuongtpu1512@gmail.com

Ву Куанг Дык

Магистр отделения нефтегазового дела инженерной школы природных ресурсов НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-864-59-47
Эл. почта: vuquangducv2@gmail.com

Sergeev V.L., Nguyen T.H.P., Vu Q.D.

Models and algorithms for identification of oil and gas reservoirs by the adaptive method of deterministic pressure moments

The problem of determining the parameters and type of oil and gas reservoirs according to wells test data at unsteady stage filtration using the adaptive method of deterministic pressure moments under uncertainty conditions of bottom hole pressure build up curve model at its initial section is considered. Case studies are given that solve the problem of identifying and interpreting pressure build up curve of oil and gas wells using field data.

Keywords: identification, adaptation, optimization, well test, pressure build-up curve, integrated systems models, a priori information, deterministic pressures moments.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-109-115

References

1. Ipatov A.I., Kremenetskij M.I., Gulyaev D.N. Modern well test technologies and rise of their importance for field development. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2009, no. 1, pp. 52–55.

2. Gavrilov K.S., Sergeev V.L. Adaptivnaya interpretatsiya nestatsionarnykh gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin v sisteme «plast–skvazhina» metodom integrirovannykh modeley [Adaptive interpretation of transient well test in the «layer–well» system by the method of integrated models]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Inzhiniring Georesurov*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 72–75.

3. Korikov A.M., Sergeev V.L., Sevostyanov D.V., Sergeev P.V., Anikanov A.S. Adaptive system of identification applied to stochastic models of industrial processes. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, no. 2(24), pp. 189–194.

4. Sergeev V.L., Romanova E.V. Adaptive interpretation of gas-dynamic research of wells identifying the initial area of a pressure recovery curve. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Inzhiniring Georesurov*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 111–117.

5. Sergeev V.L., Anikanov A.S., Kemerova P.A. Adaptivnaya interpretatsiya nestatsionarnykh gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin metodom determinirovannykh momentov davleniy [Adaptive interpretation of non-stationary wells test by deterministic moments of pressures method]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Inzhiniring Georesurov*, 2011, vol. 319, no. 4, pp. 47–50.

6. Bugalkov S.A., Olkhovskaya B.A. Povysheniye informativnosti issledovaniya neftnykh skvazikh na osnove metoda DMD [Improving the informativeness of wells test based on the DMD method]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftnyansk i gazovykh mestorozhdeniy*, 2011, no. 1, pp. 54–57.

7. Iktisanov V.A. *Opredeleniye filtratsionnykh parametrov plastov i reologicheskikh svoystv dispersnykh sistem pri razrabotke neftnykh mestorozhdeniy* [Determination of reservoir parameters and rheological properties of dispersed systems in oil fields development]. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2001, 212 p.

8. Sergeev V.L., Vu K.D. Adaptive interpretation of the results of hydrodynamic research considering a wellbore storage. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Inzhiniring Georesurov*, 2016, vol. 327, no. 9, pp. 70–77.

9. Sergeev V.L., Vu K.D. Optimization of adaptive algorithms for identification and interpretation of hydrodynamics research considering wellbore storage. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, no. 1, pp. 98–102.

10. Basovich I.B., Kaptanov B.S. Vybor filtratsionnykh modeley po dannym gidrodinamicheskikh issledovaniy [Selection of filtration models based on well testing data]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 1980, no. 3, pp. 44–47.

11. Sergeev V.L. *Integrirovannyye sistemy identifikatsii*. [Integrated identification system]. Tomsk, Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011, 198 p.

12. Sergeev V.L., Anikanov A.S. Metod adaptivnoy identifikatsii gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin s uchedom apriornoy informatsii [The method of adaptive identification of wells test with a priori information]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Inzhiniring Georesurov*, 2010, vol. 317, no. 5, pp. 50–52.

13. Koshel R.J. Enhancement of the downhill simplex method of optimization. *International Optical Design Conference*, 2002, vol. 4832, pp. 270–282.

14. Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in examples and problems]. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 2002, 544 p.

15. Sergeev V.L., Nguyen T.H.P., Krainov A.I., Gorchach A.Yu. Adaptive System for Analysis and Interpretation of Combined Well Test Data. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, 2017. doi:10.2118/187761-MS. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-187761-MS>.

Viktor L. Sergeev

Doctor of Engineering, Professor,
Department of Automated Control Systems
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-905-992-92-31
Email: SVL00@tpu.ru

Duc Q. Vu

Master student, Division for Oil and Gas Engineering,
School of Earth Sciences & Engineering
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-864-59-47
Email: vuquangducv2@gmail.com

Phuong T.H. Nguyen

PhD student, Division for Oil and Gas Engineering,
School of Earth Sciences & Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-880-11-61
Email: nguyenphuongtpu1512@gmail.com

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 537.525.5

В.П. Фролова, Н.А. Прокопенко, П.П. Кизириди

Генерация ионных пучков в вакуумном дуговом ионном источнике с двухкомпонентным катодом

Ионные источники находят широкое применение для пучковой модификации свойств различных поверхностей методом «металлургической» ионной имплантации. Использование в вакуумных дуговых источниках металлических ионов многокомпонентных катодов позволяет получать пучки сложного состава, что расширяет их технологические возможности. В работе представлены исследования параметров широкоапертурного ионного пучка, генерируемого в вакуумном дуговом ионном источнике с двухкомпонентным катодом из медно-хромового композита. Показано, что распределение зарядовых состояний ионов меди и хрома в пучке зависит от их соотношения в материале катода, а доли этих ионов в пучке соответствуют их атомарному содержанию в катоде.

Ключевые слова: вакуумный дуговой ионный источник, многокомпонентные ионные пучки, медно-хромовый композит.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-119-122

Вакуумные дуговые ионные источники ионов металла [1–4] широко используются для улучшения свойств поверхности [5–7]. Применение многокомпонентных катодов позволяет получать в таких источниках пучки ионов сложного состава [8, 9], что расширяет технологические возможности этих устройств.

Бинарные соединения металлов отличаются высокой прочностью, коррозионной стойкостью при высоких теплопроводности и электропроводности, причем эти свойства сохраняются до температуры уровня 1000 К [10]. Вместе с тем в расплавленном состоянии эти металлы практически не смешиваются, а следовательно, не образуют сплава в широком диапазоне соотношения их концентраций [11]. В нормальных условиях соединение меди и хрома находится в состоянии твердого раствора, в котором эти элементы распределены неравномерно: хром образует в медной матрице отдельные «островки», имеющие, в зависимости от его концентрации, размеры от 20 (3% хрома) до 500 мк (50% хрома), которые при высокой концентрации хрома (> 50%) сливаются между собой, образуя слоистую структуру [12].

При «металлургической» ионной имплантации проникновение ускоренного иона в поверхность твердого тела происходит вследствие его высокой кинетической энергии. Поэтому медь и хром в поверхностном неравновесном сплаве, полученном методом ионной имплантации, могут иметь однородное распределение атомов по поверхности. Получение таких слоев представляется важным для ряда практических применений, где основным элементом воздействия выступает поверхность, например для электродов вакуумного выключателя [13]. Получение таких имплантированных слоев возможно с помощью ионного пучка вакуумного дугового источника с композитным катодом на основе меди и хрома [8]. Вместе с тем практическое применение таких пучков требует проведения детального исследования его параметров и масс-зарядового состава. Экспериментальному изучению этого вопроса посвящена настоящая работа.

Методика и техника эксперимента

Принципиальная схема экспериментальной установки на базе вакуумного дугового ионного источника Mevva-V.Ru [2] представлена на рис. 1. Разряд зажигался между торцом цилиндрического катода диаметром 6,3 мм, выполненного из композита на основе CuCr, и полым анодом с внутренним диаметром 14 см. Расстояние между катодом и перфорированным торцом анода, являющимся эмиссионным электродом многоапертурной ускоряющей ионно-оптической системы, составляло 15 см. В качестве материалов катода использовались два композита с различным соотношением доли атомов меди и хрома. Первый, в котором доли атомов меди и хрома были одинаковы, и второй, в котором доля меди составляла 70%, а хрома – 30% (далее – CuCr-50/50 и CuCr-70/30 соответственно).

Инициирование импульса тока дуги с амплитудой в сотни ампер и длительностью 250 мкс осуществлялось вспомогательным разрядом по поверхности керамики, разделяющей «поджигающий» электрод и катод, при приложении между этими электродами импульса напряжения амплитудой 14 кВ и длительностью около 10 мкс. При горении разряда плазма материала катода заполняла анодную полость, и с её поверхности, ограниченной эмиссионным электродом, велся отбор ионов [14] и формировался ускоренный ионный пучок диаметром 10 см. Максимальное ускоряющее напряжение ионного источника составляло 60 кВ. Масс-зарядовый состав этого пучка анализировался при помощи времяпролетного масс-спектрометра [15]. Рабочее давление в экспериментах, обеспечиваемое криогенной высоковакуумной и безмасляной форвакуумной откачками, составляло уровня 10^{-6} Торр.

Результаты и их обсуждение

Осциллограммы импульса ионного тока на подвижный магнитоизолированный цилиндр Фарадея, который в своем центральном положении регистрировал около 1/7 от полного тока пучка, и соответствующего этому импульсу импульса тока дуги представлены в случае катода CuCr-50/50 на рис. 2. При приведенном на рис. 2 токе дуги амплитудой около 800 А амплитуда полного тока ионного пучка составляла около 1 А.

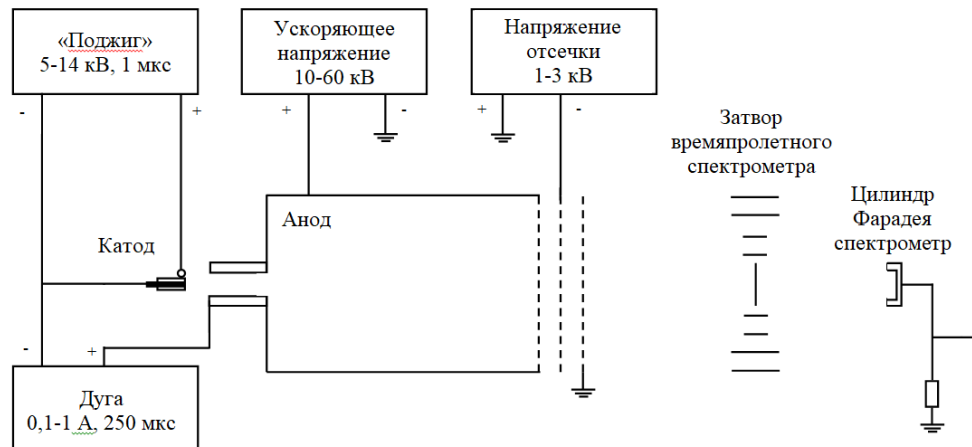


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки на базе вакуумного дугового ионного источника Mevva-V.Ru

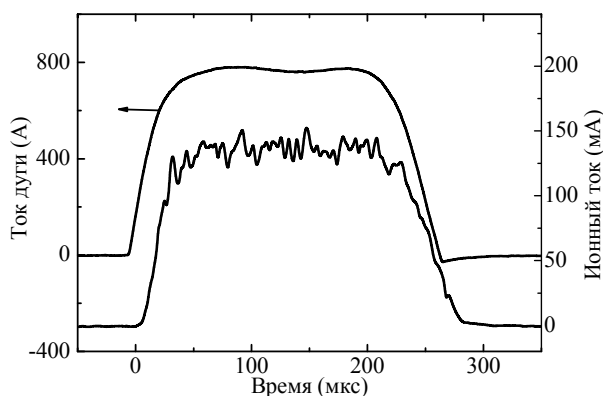


Рис. 2. Ток разряда и соответствующий ему ионный ток пучка на цилиндр Фарадея для сплава меди и хрома CuCr-50/50

Масс-зарядовый спектр состава ионного пучка в случае катода CuCr-50/50, при ускоряющем напряжении 30 кВ и амплитуде тока дуги 800 А, измеренный через 150 мкс после начала импульса, представлен на рис. 3. Видно, что максимальные зарядовые состояния ионов как меди, так и хрома достигли $3+$, а их минимальные зарядовые состояния были $-1+$. Следует отметить, что вследствие низкого остаточного давления в пучке практически отсутствуют ионы газовых примесей [16].

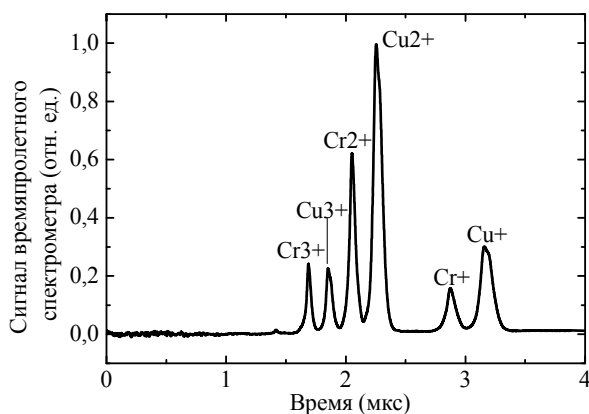


Рис. 3. Спектр состава ионного пучка в случае катода CuCr-50/50. Ток дуги – 800 А. Момент измерения – через 150 мкс после начала импульса

Зависимости среднего зарядового состояния ионов меди и хрома в пучке для двух материалов катодов представлены на рис. 4. Из зависимостей следует, что в начальный момент импульса пучка доля более высокозарядных ионов больше. По-видимому, это связано с более высоким напряжением горения разряда в начальный период импульса разряда. В дальнейшем, после примерно 150 мкс горения разряда, все зависимости выходят в насыщение и состав ионного пучка практически не изменяется.

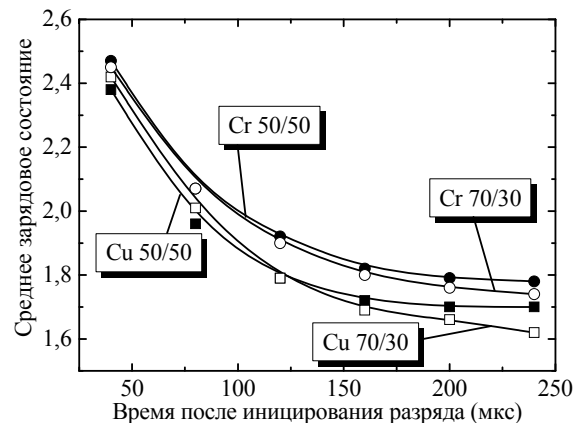


Рис. 4. Зависимости средней зарядности ионов меди и хрома в пучке от длительности после начала импульса для катодов из CuCr-50/50 и CuCr-70/30. Амплитуда тока дуги 500 А

Отметим также, что средний заряд ионов каждого элемента, а соответственно и распределение ионов этого элемента по зарядовым состояниям, слабо изменяется при изменении материала катода. Это свидетельствует о том, что распределение ионов по зарядовым состояниям в основном определяется не соотношением этих элементов в катоде, а напряжением горения разряда, а следовательно, температурой электронов разряда и распределением потенциалов многократной ионизации каждого элемента. Это объясняет факт отсутствия в первые 50 мкс после начала импульса пучка ионов Cu^{4+} , но наличия в нем ионов Cr^{4+} : потенциал ионизации первых ионов – 75,5 эВ, вторых – 54,4 эВ [17], и температуры

электронов разряда даже в начале импульса недостаточно для появления в ней заметной доли ионов Cu^{4+} [18].

Относительная доля иона каждого типа в пучке определялась по площади его пика, нормированной на зарядность, отнесенной к сумме нормированных площадей пиков всех типов ионов. Зависимости отношения количества ионов (в частицах) меди и хрома в пучке от тока разряда представлены на рис. 5.

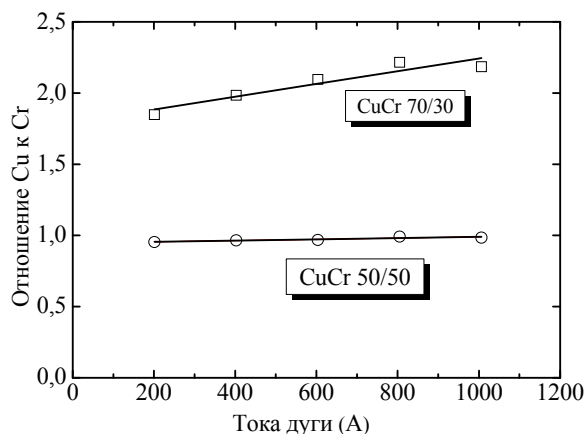


Рис. 5. Зависимости отношения меди к хрому в ионном пучке от тока разряда для катодов CuCr-50/50 и CuCr-70/30. Момент измерения состава ионного пучка – 150 мкс после инициирования дуги, остаточное давление – $1 \cdot 10^{-6}$ Торр

Из зависимостей следует, что в случае катода CuCr-50/50 отношение ионов меди к хрому равно 1:1 во всем диапазоне токов и совпадает с отношением атомов этих элементов в материале катода. В случае катода CuCr-70/30 при увеличении тока дуги доля ионов меди к хрому увеличивается, но в среднем составляет 2,1:1, что также близко (2,3:1) к указанному выше отношению. Таким образом, можно утверждать, что доля ионов меди и хрома в пучке вакуумного дугового ионного источника с композитным катодом на основе этих элементов определяется стехиометрическим составом катода.

Заключение

На примере катодов на основе медно-хромового композита показано, что в пучке вакуумного дугового ионного источника с катодами, выполненными из двух элементов, соотношение ионов этих элементов соответствует их атомарному соотношению в материале катода, а среднее зарядовое состояние ионов каждого элемента в пучке определяется распределением потенциалов многократной ионизации этого элемента. В вакуумном дуговом источнике с катодами на основе медно-хромового композита получены широкоапертурные (100 см^2) импульсные (250 мкс) ионные пучки с током уровня 1 А при ускоряющем напряжении до 60 кВ, которые могут использоваться для создания на поверхности твердого тела слоев меди и хрома с однородным распределением атомов этих элементов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-38-00350 мол а.

Литература

1. Brown I. Some Vacuum-Arc-Based Plasma and Ion Beam Tools for Surface Modification // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 7–13.
2. Current status of plasma emission electronics: II hardware / A.S. Bugaev, A.V. Vizir, V.I. Gushenets et al. // Laser and Particle Beams. – 2003. – Vol. 21, No. 2. – P. 139–156.
3. Vacuum arc gas/metal ion sources with a magnetic field / A.G. Nikolaev, E.M. Oks, P.M. Schanin, G.Yu. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 1996. – Vol. 67, No. 3. – P. 1213–1215.
4. The «TITAN» ion source / S.P. Bugaev, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, P.M. Schanin, G.Y. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 1994. – Vol. 65, No. 10. – P. 3119–3125.
5. Фазовое состояние титановых материалов после имплантации ионами алюминия / И.А. Курзина, Н.А. Попова, М.П. Калашников и др. // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 11-3. – С. 112–119.
6. Surface resistivity tailoring of ceramic insulators for an ion microprobe application / A. Nikolaev, E.M. Oks, K. Savkin et al. // Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201, No. 19-20. – P. 8120–8122.
7. Current status of plasma emission electronics: I. Basic physical processes / V.I. Gushenets, E.M. Oks, G.Yu. Yushkov, N.G. Rempe // Laser and Particle Beams. – 2003. – Vol. 21, No. 2. – P. 123–138.
8. Generation of multicomponent ion beams by a vacuum arc ion source with compound cathode / K.P. Savkin, Yu.G. Yushkov, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, G.Yu. Yushkov // Review of Scientific Instruments. – 2010. – Vol. 81, No. 2. – P. 02A501.
9. Angular distribution of ions in vacuum arc plasma with single-element and composite cathode / A.G. Nikolaev, G.Y. Yushkov, K.P. Savkin, E.M. Oks // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, No. 8. – P. 1923–1928.
10. Шухардина С.В. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. – М.: Наука, 1979. – 248.
11. Chakrabarti D.J. The Cr-Cu (Chromium-Copper) system / D.J. Chakrabarti, D.E. Laughlin // Journal of Phase Equilibria. – 1984. – Vol. 5, No. 1. – P. 59–68.
12. URL: <https://www.plansee.com/en/products/components/electrical-contacts/copper-chromium-cucr.html> (дата обращения: 27.11.2018).
13. The features of 0.4 kV motor interruption by a vacuum contactor with different contact materials / A.M. Chaly, A.T. Chalaya, I.N. Poluyanov, V. Poluyanov // International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV): Proceedings XVIII international symposium. – Eindhoven, Netherlands, 1998. – Vol. 2. – P. 435–438.
14. «TITAN» – источник газовых и металлических ионов на основе контрагированного разряда и вакуумной дуги / С.П. Бугаев, Е.М. Окс, П.М. Щанин, Г.Ю. Юшков // Известия вузов. Физика. – 1994. – Т. 37, № 3. – С. 53–65.
15. Simple and inexpensive time-of-flight charge-to-mass analyzer for ion beam source characterization / V.I. Gushenets, A.G. Nikolaev, E.M. Oks et al. // Review of Scientific Instruments. – 2006. – Vol. 77, No. 6. – P. 063301.
16. Николаев А.Г. Влияние остаточного газа на зарядовое распределение ионов в плазме вакуумного дугового разряда / А.Г. Николаев, Е.М. Окс, Г.Ю. Юшков // Журнал технической физики. – 1998. – Т. 68, № 9. – С. 24–28.
17. Calculated ionization potentials for multiply charged ions / T.A. Carlson, C.W. Nestor, N. Wasserman, J.D. McDowell // Atomic data. – 1970. – Vol. 2. – P. 63–99.
18. Фролова В.П. Генерация многозарядных и многокомпонентных импульсных ионных пучков на основе сильноточной вакуумной дуги микросекундной длительности: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2018. – 135 с.

Фролова Валерия Петровна

Мл. науч. сотр. ТУСУР*, мл. науч. сотр. ИСЭ СО РАН**
 *Ленина пр., д. 40, г. Томск, Россия, 634050
 **Академический пр., д. 2/3, г. Томск, Россия, 634055
 Тел.: +7 (382-2) 49-17-76
 Эл. почта: Frolova_Valeria_90@mail.ru

Прокопенко Никита Андреевич

Аспирант ИСЭ СО РАН
 Академический пр., д. 2/3, г. Томск, Россия, 634055
 Тел.: +7 (382-2) 49-17-76
 Эл. почта: nick08_phantom@mail.ru

Кизириди Павел Петрович

Мл. науч. сотр. ИСЭ СО РАН
 Академический пр., д. 2/3, г. Томск, Россия, 634055
 Тел.: +7 (382-2) 49-17-76
 Эл. почта: kiziridi_pavel@mail.ru

Frolova V.P., Prokopenko N.A., Kiziridi P.P.

Generation of ion beams in a vacuum arc ion source with a two-component cathode

Ion sources are widely used for beam modification of the various surfaces properties by the method of «metallurgical» ion implantation. Use of metallic ions of multicomponent cathodes in vacuum arc sources allows to obtain complex composition beams, which expands their technological capabilities. This paper presents studies of a wide-aperture ion beam parameters generated in a vacuum arc ion source with a two-component cathode of a copper-chromium composite. It is shown that charge states distribution of copper and chromium ions in a beam depends on their ratio in the cathode material, and the fractions of these ions in the beam correspond to their atomic content in the cathode.

Keywords: vacuum arc ion source, multicomponent ion beams, copper-chromium composite.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-119-122

References

1. Brown I. Some Vacuum-Arc-Based Plasma and Ion Beam Tools for Surface Modification. *Doklady TUSUR*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 7–13 (in Russ.).
2. Bugaev A.S., Vizir A.V., Gushenets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Burachevsky Yu.A., Burdovitsin V.A., Osipov I.V., Rempe N.G. Current status of plasma emission electronics: II hardware. *Laser and Particle Beams*, 2003, vol. 21, no. 2, pp. 139–156.
3. Nikolaev A.G., Oks E.M., Schanin P.M., Yushkov G.Yu. Vacuum arc gas/metal ion sources with a magnetic field. *Review of Scientific Instruments*, 1996, vol. 67, no. 3, pp. 1213–1215.
4. Bugaev S.P., Nikolaev A.G., Oks E.M., Schanin P.M., Yushkov G.Y. The «TITAN» ion source. *Review of Scientific Instruments*, 1994, vol. 65, no. 10, pp. 3119–3125.
5. Kurzina I.A., Popova N.A., Kalashnikov M.P. et al. Phase state of titanium materials after implantation with aluminum ions. *Isvestiia vusshikh ychebnich zavedenii. Fizika*, 2011, vol. 54, no. 11-3, pp. 112–119 (in Russ.).
6. Nikolaev A., Oks E.M., Savkin K., Yushkov G.Yu., Brenner D.J., Johnson G., Randers-Pehrson G., Brown I.G., MacGill R.A. Surface resistivity tailoring of ceramic insulators for an ion microprobe application. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, no. 19-20, pp. 8120–8122.
7. Gushenets V.I., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Rempe N.G. Current status of plasma emission electronics: I. Basic physical processes. *Laser and Particle Beams*, 2003, vol. 21, no. 2, pp. 123–138.

8. Savkin K.P., Yushkov Yu.G., Nikolaev A.G., Oks E.M., Yushkov G.Yu. Generation of multicomponent ion beams by a vacuum arc ion source with compound cathode. *Review of Scientific Instruments*, 2010, vol. 81, no. 2, pp. 02A501.

9. Nikolaev A.G., Yushkov G.Y., Savkin K.P., Oks E.M. Angular distribution of ions in vacuum arc plasma with single-element and composite cathode. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, vol. 41, no. 8, pp. 1923–1928.

10. Shuchardina S.V. *Dvoynye I mnogokomponentnyye sistemy na osnove medi*. Moskva, Nauka, 1979. 248 p. (in Russ.).

11. Chakrabarti D.J., Laughlin D.E. The Cr-Cu (Chromium-Copper) system. *Journal of Phase Equilibria*, 1984, vol. 5, no. 1, pp. 59–68.

12. URL: <https://www.plansee.com/en/products/components/electrical-contacts/copper-chromium-cucr.html> (assessed: 27 November 2018).

13. Chaly A.M., Chalaya A.T., Poluyanov I.N., Poluyanov V. The features of 0.4 kV motor interruption by a vacuum contactor with different contact materials. *International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. Proceedings XVIII international symposium, Eindhoven, Netherlands, 1998, vol. 2, pp. 435–438.

14. Bugaev S.P., Oks E.M., Shchanin P.M., Yushkov G.Y. «Titan» a source of gas and metal ions based on a contracted discharge and vacuum arc. *Russian Physics Journal*, 1994, vol. 37, no. 3, pp. 245–254.

15. Gushenets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M. et al. Simple and inexpensive time-of-flight charge-to-mass analyzer for ion beam source characterization. *Review of Scientific Instruments*, 2006, vol. 77, no. 6, pp. 063301.

16. Nikolaev A.G., Oks E.M., Yushkov G.Yu. Effect of residual gas on the ion charge distribution in vacuum arc discharge plasmas. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 43, no. 9, pp. 1031–1034.

17. Carlson T.A., Nestor C.W., Wassrman N., McDowell J.D. Calculated ionization potentials for multiply charged ions. *Atomic data*, 1970, vol. 2, pp. 63–99.

18. Frolova V.P. Generatsiia mnogozaryadnykh I mnogokomponentnykh impulsnykh ionnykh puchkov na osnove silnotochnoi vakyymnoi dugi miklosekundnoi glitelnosti [Generation of multiply charged and multicomponent pulsed ion beams based on a high-current microsecond vacuum arc. *Cand. Diss.*] Tomsk, 2018. 135 p. (in Russ.).

Valeria P. Frolova

Junior Researcher, University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)*, Junior Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS**
 *40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
 **2/3, Akademicheskyy av., Tomsk, Russia, 634055
 Phone: +7 (382-2) 49-17-76
 Email: Frolova_Valeria_90@mail.ru

Nikita A. Prokopenko

PhD student, Institute of High Current Electronics SB RAS
 2/3, Akademicheskyy av., Tomsk, Russia, 634055
 Phone: +7 (382-2) 49-17-76
 Email: nick08_phantom@mail.ru

Pavel P. Kiziridi

Junior Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS
 2/3, Akademicheskyy av., Tomsk, Russia, 634055
 Phone: +7 (382-2) 49-17-76
 Email: kiziridi_pavel@mail.ru

УДК 531.133.3

А.М. Малышенко, С.А. Майков

Методика определения относительных энергозатрат привода раскрытия рефлектора антенны зонтичного типа при наземных его испытаниях на стенде с активной системой обезвешивания

Приведена методика оценки эффективности работы системы активного обезвешивания рефлектора антенны зонтичного типа большого диаметра (до 12 м), используемой в стенде для наземных испытаний механических устройств таких рефлекторов, позволяющей имитировать их невесомость. Она определяет долю энергозатрат их приводов раскрытия от неточности компенсации влияния веса спиц рефлектора на процесс их раскрытия.

Ключевые слова: рефлектор антенны, наземные испытания, механические устройства, стенд с активной системой обезвешивания, механизм выдвижения мачты, привод раскрытия, относительные энергозатраты.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-123-129

Эффективным способом улучшения радиосвязи в информационных спутниковых системах является увеличение диаметров рефлекторов приемопередающих антенн, размещаемых на телекоммуникационных спутниках.

За счет увеличения диаметра размещаемой на борту КА антенны связи и соответственно ее чувствительности к принимаемым электромагнитным сигналам можно значительно улучшить мобильную (в том числе телефонную) связь и сделать ее возможной без использования ныне применяемых для этого ретрансляционных вышек, обеспечить ее в труднодоступных участках нашей планеты, что особенно актуально для Российской Федерации с её обширной (а во многих регионах и почти не заселенной) территорией. Увеличение диаметров размещаемых на спутниках связи приемопередающих антенн расширит их функциональные возможности также и в решении задач зондирования поверхностных процессов на Земле (землетрясений, извержений вулканов, цунами, техногенных катастроф и т.п.), в исследованиях излучений Вселенной.

В этой связи и в России, и за рубежом активно ведутся работы по проектированию и испытаниям крупногабаритных рефлекторов антенн диаметром 8, 12, 24, 48 м и более [1–9]. Такие рефлекторы для упрощения их вывода в космос чаще всего имеют зонтичный вариант исполнения и включают в себя, как правило, четыре, шесть, восемь или двенадцать однозвенных, двухзвенных или трехзвенных силовых спиц. Конструктивные решения, закладываемые в такие рефлекторы, отражены, в частности, в патентах [10–14]. Изготовление крупногабаритных рефлекторов антенн непосредственно в космосе, как это предлагается делать в [4], еще предстоит освоить.

Для наземных испытаний работоспособности механических устройств таких рефлекторов (перелома их из сложного транспортно-монтажного состояния в раскрытое рабочее) используются специализированные стенды, которые обеспечивают обезвешивание трансформируемых частей рефлектора (спиц, сетеполотна и его крепежных устройств на спицах) с

целью обеспечения условий при таких испытаниях, приближенных к их работе в космическом пространстве. К числу таких стендов относится и стенд, разработанный Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН по заказу АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева» [15]. В этом стенде в процессе раскрытия рефлектора антенны каждая из его спиц обезвешивается с помощью тросового подвеса на подвижной каретке, перемещающейся по расположенной над спицей горизонтальной направляющей. Сила натяжения троса обеспечивается в процессе раскрытия рефлектора с помощью системы автоматической его стабилизации на уровне, равном весу спицы, по показаниям датчика силы, встроенного в тросовый подвес. Электропривод натяжения троса должен не только поддерживать в нем требуемую силу натяжения, но и наматывать освобождающуюся его часть на связанную через редуктор с электродвигателем привода катушку. Сам трос в процессе раскрытия удерживается в вертикальном положении с помощью следящей системы, перемещающей каретку по ее направляющей по информации с датчика углового отклонения троса от вертикали.

Раскрытие спиц рефлектора производится с помощью механизма выдвижения мачты (МВМ), снабженного электроприводом постоянного тока. Все спицы рефлектора связаны с вершиной мачты МВМ с помощью гибких тяг (оттяжек) телескопического типа из углепластикового материала, вторые концы которых жестко закреплены на спицах (рис. 1). Подкос шарнирно закреплен на спице и на первой стадии процесса раскрытия рефлектора (еще до начала разворота спиц) при выдвижении мачты с помощью специального устройства зацепления, имеющегося на тяге, поворачивается вокруг своей оси вращения и занимает рабочее положение (разворачивается в зависимости от конкретного типа рефлектора на 90 или 98 дуговых градусов). Тем самым обеспечиваются вращающие моменты для поворота спиц в начальный период раскрытия рефлектора.

Скорость вращения двигателя постоянного тока МВМ в процессе раскрытия рефлектора не регулируется.

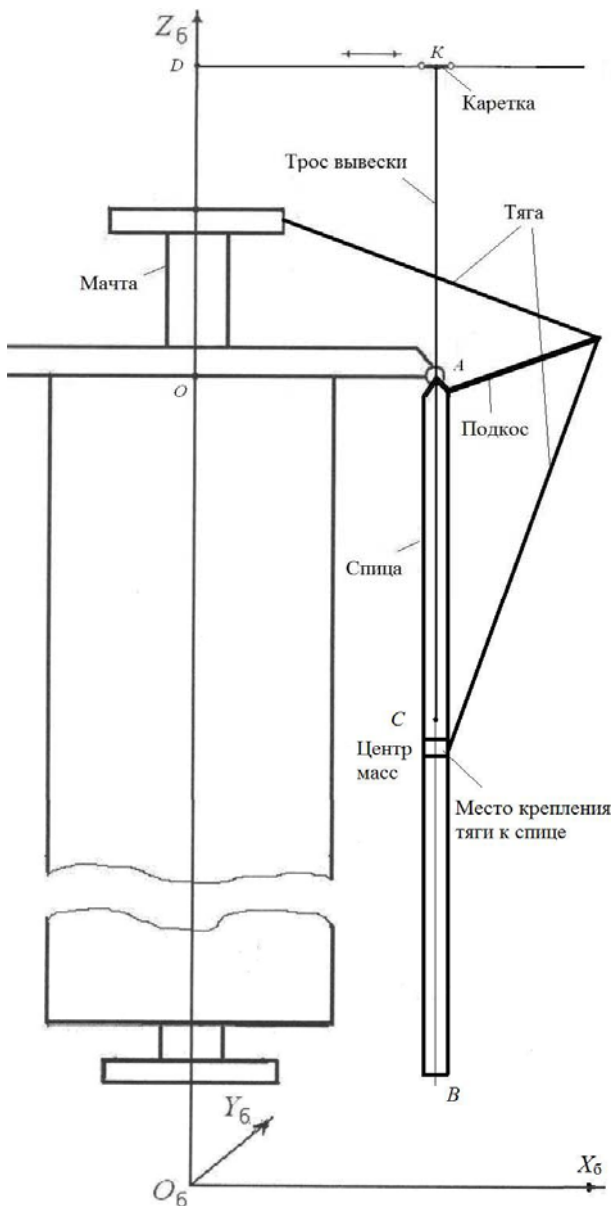


Рис. 1. Кинематическая схема механизма раскрытия спиц зонтичного рефлектора на стенде его обезвешивания

Из-за неизбежной неточности в моделировании невесомости крупногабаритных трансформируемых рефлекторов антенн (КТРА) при их наземных испытаниях приводы их раскрытия будут работать в условиях, отличающихся от тех, что будут при раскрытии рефлекторов в космосе. Часть их энергозатрат будет расходоваться на преодоление веса «недообезвешенных» частей раскрываемых рефлекторов. Знание этих энергозатрат необходимо для решения компромиссной по сути задачи выбора мощности электродвигателя привода раскрытия такого КТРА, которая бы с одной стороны гарантировала надежное раскрытие рефлектора в космосе и, а с другой – не приводила к завышению массогабаритных характеристик всех частей этого привода.

Из-за уникальности спроектированного и описанного выше стенда для наземных испытаний КТРА, до сих пор нет методики определения с достаточной для практики точностью той доли энергозатрат привода раскрытия КТРА зонтичного типа, которая связана с неидеальностью обезвешивания испытываемого на таком стенде рефлектора. На решение этой задачи и направлена данная статья.

Формулировка основной задачи стенда с системой обезвешивания активной при раскрытии рефлектора антенны

Реализованная в описанном выше стенде система обезвешивания по своему принципу действия относится к числу активных, так как силы обезвешивания рефлектора создаются приводным электродвигателем механизма выдвижения мачты. Она должна исключить из момента нагрузки на валу этого двигателя дополнительные моменты, обусловленные весом раскрываемых спиц, сетеполотна и его крепежных частей на спицах в течение всего времени перевода рефлектора из транспортировочного состояния в рабочее, при котором сетеполотно принимает заданную (обычно параболическую) форму. Тем самым механические устройства рефлектора при его стендовых испытаниях приводятся в состояние, соответствующее их работе при раскрытии рефлектора в космическом пространстве, где практически отсутствует гравитация и силы тяжести.

Это означает, что стендовая система активного обезвешивания (САО) должна обеспечивать в процессе испытаний механических устройств рефлектора на стенде инвариантность системы управления приводом механизма выдвижения мачты от веса раскрываемых частей рефлектора.

В тех случаях, когда на стенде проводятся испытания механических устройств рефлектора с одновесными спицами, расчетная схема для решения задачи обезвешивания каждой его спицы при ее раскрытии приведена на рис. 2.

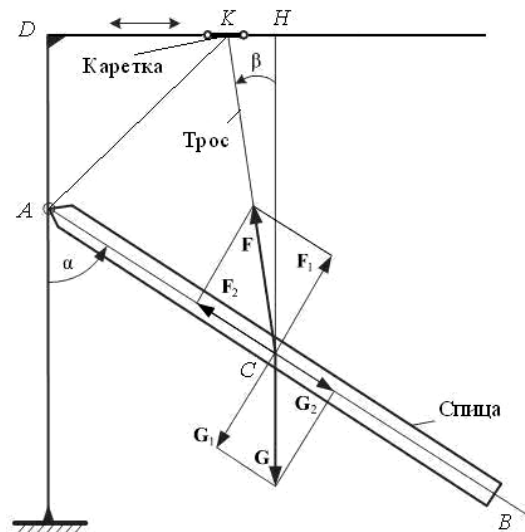


Рис. 2. Расчетная схема обезвешивания одновесной спицы рефлектора при закреплении троса вывески в центре ее масс

При этом рассматривается вариант вывески спицы на перемещающейся по горизонтальной направляющей опоре каретке на тросе. Нижний конец троса закреплен в центре масс спицы C , а верхний конец намотан на установленной на каретке катушке, снабженной электроприводом, входящим в систему автоматической стабилизации в процессе разворота спицы силы натяжения в тросе F , равной ее весу G . Каретка в процессе раскрытия спицы автоматически перемещается на горизонтальной направляющей опоре стенда с помощью следящей системы, поддерживающей с допустимой точностью вертикальное положение троса.

Будем полагать, что текущее положение спицы в процессе раскрытия от ее исходного вертикального характеризуется углом α , а угол отклонения троса от вертикали равен β .

В таком случае в процессе раскрытия спицы ее вес, как и в космосе, не будет влиять на работу ее привода при условии, что сумма моментов вращения, обусловленных векторами веса \mathbf{G} и силы натяжения в тросе \mathbf{F} (рис. 2), вокруг оси вращения спицы A будет оставаться равной нулю, т.е.

$$M_A(\mathbf{G}) + M_A(\mathbf{F}) = 0. \quad (1)$$

Кроме того, будет равна нулю также суммарная сила воздействия на опорную стойку стенда со стороны спицы в центре A ее шарнирной вывески на ней

$$\mathbf{F}_A(\mathbf{G}) + \mathbf{F}_A(\mathbf{F}) = 0. \quad (2)$$

В этой связи правомерно утверждать, что выполнение условий (1) и (2) для всех спиц рефлектора зонтичного типа с однозвенными спицами является условием абсолютной инвариантности работы привода его раскрытия от веса всех его силовых формообразующих спиц. Условия (1) и (2), с учетом принятых на рис. 2 обозначений, могут быть записаны также в виде

$$\mathbf{G}_1 + \mathbf{F}_1 = \mathbf{G} \cdot \sin \alpha + \mathbf{F} \cdot \cos(\alpha - \beta) = 0; \quad (3)$$

$$\mathbf{G}_2 + \mathbf{F}_2 = \mathbf{G} \cdot \cos \alpha + \mathbf{F} \cdot \sin(\alpha - \beta) = 0. \quad (4)$$

Следует иметь в виду, что выполнение условий (1) и (2) абсолютной инвариантности работы привода раскрытия спиц рефлектора от их веса одновременно можно реализовать только при одновременном выполнении следующих условий:

- 1) центры тросовых вывесок спиц рефлектора точно совпадают с центрами масс этих спиц;
- 2) тросы вывески в процессе раскрытия рефлектора остаются в строго вертикальном положении (для всех вывесок спиц $\beta = 0$);
- 3) силы натяжения во всех тросах вывески спиц точно равны весам последних.

В ситуациях, когда хотя бы одно из этих трех условий не выполняется, энергозатраты привода раскрытия рефлектора будут отличаться от тех, которые были бы у него при раскрытии рефлектора в космосе.

Определение доли энергозатрат привода раскрытия рефлектора, обусловленной неточностью его обезвешивания

Предлагаемая методика предназначена для определения относительных потерь энергии приводов раскрытия рефлекторов антенн в процессе наземных испытаний их механических устройств, обусловленных неточностью обезвешивания спиц рефлектора входящей в состав стенда системой их активного обезвешивания.

Механизм выдвижения мачты в таких рефлекторах включает в свой состав электропривод с двигателем постоянного тока с нерегулируемой скоростью вращения, который через зубчатую и шнековую передачи обеспечивает линейные перемещения мачты МВМ, а через закрепленные на ней оттяжки – и спицы рефлектора.

Энергозатраты этого электропривода при раскрытии рефлектора антенны из транспортировочного положения в рабочее могут быть определены по формуле

$$E = E_{\text{рп}} + E_{\text{рс}} = \int_0^{T_{\text{рп}}} M_{\text{рп}}(t) \cdot \omega_{\text{рп}}(t) \cdot dt + \int_{T_{\text{рп}}}^{T_{\text{рр}}} M_{\text{рс}}(t) \cdot \omega_{\text{рс}}(t) \cdot dt, \quad (5)$$

где $E_{\text{рп}}$ – энергозатраты электропривода МВМ на интервале времени $[0, T_{\text{рп}}]$ раскрытия подкосов на спицах рефлектора; $E_{\text{рс}}$ – энергозатраты электропривода МВМ на интервале времени $[T_{\text{рп}}, T_{\text{рр}}]$ раскрытия самих спиц рефлектора; $M_{\text{рп}}, M_{\text{рс}}$ – электромеханические моменты, развиваемые электродвигателем МВМ на его валу на этапах раскрытия подкосов на спицах и самих спиц соответственно; $\omega_{\text{рп}}, \omega_{\text{рс}}$ – соответственно угловые скорости вращения вала электродвигателя МВМ на этапах раскрытия подкосов на спицах и самих спиц.

Полагаем, что развиваемый электродвигателем электромеханический момент пропорционален текущему значению его тока, т.е.

$$M(t) = c_M \cdot I(t),$$

где c_M – электромеханическая постоянная двигателя, определяемая по его паспортным данным.

Таким образом, общие энергозатраты электропривода МВМ при переводе рефлектора антенны из транспортировочного состояния в рабочее могут быть вычислены путем измерения его тока и скорости в процессе раскрытия рефлектора.

В механизмах выдвижения мачты, используемых в рефлекторах антенн диаметрами 8,6 и 12 м нет датчика скорости какого-либо из его подвижных элементов (приводного электродвигателя, шнека или выдвижной мачты). Известно лишь, что номинальная скорость используемого в нем двигателя составляет 6000 об/мин и что он имеет существенный за-

пас по моменту при раскрытии рефлекторов указанных антенн. Поэтому в расчетной формуле (5), которая определяет энергозатраты привода рефлектора при его раскрытии, можно принимать $\omega_{pp} = \omega_{pc} = \omega_{ном} = 6000$ об/мин.

Неточность обезвешивания спиц рефлектора при его раскрытии во время испытаний на стенде с системой обезвешивания активной характеризуется неравенствами в условиях абсолютной инвариантности работы привода МВМ (1), (2) от веса раскрываемых с его помощью спиц рефлектора, т.е. когда

$$\Delta M_A \triangleq M_A(\mathbf{G}) + M_A(\mathbf{F}) \neq 0$$

и/или

$$\Delta \mathbf{F}_A \triangleq \mathbf{F}_A(\mathbf{G}) + \mathbf{F}_A(\mathbf{F}) \neq 0.$$

Определим аналитические выражения для ошибок обезвешивания одной из спиц рефлектора по моменту ΔM_A и по усилию $\Delta \mathbf{F}_A$ для варианта подвеса этой спицы на стенде с СОА в ее центре масс, используя при этом обозначения, приведенные на рис. 2, и полагая, что центр масс спицы находится в точке C на расстоянии $L_{AC} \triangleq AC$ от оси ее вращения.

Исходя из использованных на рис. 2 условных обозначений, получаем

$$\mathbf{M}_A = L_{AC}(\mathbf{F}_1 - \mathbf{G}_1) = L_{AC}(\mathbf{F} \cdot \sin(\alpha - \beta) - \mathbf{G} \cdot \sin \alpha),$$

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{G}_2 - \mathbf{F}_2 = \mathbf{G} \cdot \cos \alpha - \mathbf{F} \cdot \cos(\alpha - \beta).$$

Для обеспечения нулевых значений вращающего момента \mathbf{M}_A относительно оси шарнира A и силы \mathbf{F}_A давления в шарнире A вдоль оси спицы в алгоритме работы системы активного обезвешивания при варианте вывески спиц в центрах их масс предусматриваются следующие задающие воздействия на ее системы автоматического управления:

– для следящей системы каретки: $\beta_{зад} = 0$,

– для системы автоматического натяжения троса вывески: $F_{зад} = G$.

Неидеальной работе следящей системы каретки соответствует ошибка в позиционировании каретки $\beta \neq 0$. Неидеальная работа системы автоматического управления натяжением троса приводит к нарушению требуемого от нее поддержания силы натяжения в тросе, равной весу обезвешиваемой спицы. Эта сила может быть представлена в виде

$$F = G \pm \Delta F,$$

где ΔF – ошибка системы автоматического управления натяжением троса.

Таким образом, при ошибках в работе следящей системы каретки и в системе автоматического управления натяжением троса вращающий момент относительно оси шарнира A будет определяться величиной

$$\begin{aligned} M_A &= L_{AC}(F \cdot \sin(\alpha - \beta) - G \cdot \sin \alpha) = \\ &= L_{AC}[(G \pm \Delta F) \cdot \sin(\alpha - \beta) - G \cdot \sin \alpha], \end{aligned}$$

а действующая на опору в точке A сила

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_A &= \mathbf{G} \cdot \cos \alpha - \mathbf{F} \cdot \cos(\alpha - \beta) = \\ &= \mathbf{G} \cdot \cos \alpha - [(G \pm \Delta F) \cdot \cos(\alpha - \beta)]. \end{aligned}$$

Здесь и далее $F \triangleq |\mathbf{F}|$; $G \triangleq |\mathbf{G}|$.

При малом уровне ошибки β в работе следящей системы каретки, например, не превышающем 1–2 дуговых градусов, что будет реально обеспечено этой следящей системой:

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta \approx \sin \alpha; \quad (6)$$

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta \approx \cos \alpha. \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) можно принять при расчете энергозатрат привода раскрытия рефлектора следующие значения для M_A и \mathbf{F}_A

$$M_A = \pm \Delta F \cdot L_{AC} \cdot \sin \alpha; \quad \mathbf{F}_A = \pm \Delta \mathbf{F} \cdot \cos \alpha.$$

При этом вектор $\Delta \mathbf{F}$ будет направлен по оси спицы.

Определение энергозатрат приводов раскрытия рефлекторов, обусловленных неточностью обезвешивания их спиц

Энергозатраты привода МВМ на компенсацию момента M_A , обусловленного неточностью обезвешивания спицы, могут быть определены по следующей формуле:

$$E(M_A) = \int_{T_{pp}}^{T_{pp}} M_A(t) \cdot \omega_c(t) \cdot dt, \quad (8)$$

где ω_c – угловая скорость вращения спицы во время ее раскрытия.

В (8) интегрирование следует начинать с момента начала раскрытия спиц, а не с момента начала работы механизма выдвижения мачты, так как на интервале времени $[0, T_{pp}]$ перемещения мачты МВМ обуславливают лишь раскрытие подкосов, расположенных на спицах с целью увеличения прикладываемых в последующем через оттяжки моментов вращения на первой стадии раскрытия спиц.

Суммарные энергозатраты привода раскрытия рефлектора, связанные с компенсацией моментов M_A от всех спиц рефлектора, могут быть определены как

$$E_{\Sigma}(M_A) = \sum_{i=1}^{N_c} \int_{T_{pp}}^{T_{pp}} M_{A_i}(t) \cdot \omega_{c_i}(t) \cdot dt. \quad (9)$$

В расчетной формуле (9) величина M_{A_i} определяет момент вращения i -й спицы ($i \in \overline{1, N_c}$, где N_c – число спиц в рефлекторе) вокруг ее оси вращения A , обусловленный неточностью выполнения условия инвариантности (1). В ней же ω_{c_i} – угловая скорость i -й спицы.

Так как все спицы рефлектора раскрываются одним и тем же электродвигателем и их угловые

скорости при раскрытии не измеряются, то при расчете суммарных энергозатрат привода раскрытия рефлектора, связанных с компенсацией моментов M_A от всех спиц рефлектора, все $\omega_{c_i}(t)$ в (9) могут быть приняты одинаковыми и постоянными, равными средней расчетной величине, определяемой фактическим временем раскрытия спиц (перевода их из транспортировочного положения в рабочее). Эта средняя угловая скорость раскрытия спиц

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\alpha_{\text{max}}}{T_{\text{pp}} - T_{\text{рп}}}.$$

Определим дополнительные энергозатраты привода раскрытия одной из спиц рефлектора, обусловленные неточностью реализации системой активного обезвешивания этой спицы приведенного выше условия (2) и связанные с накладываемой при этом на шарнир спицы вдоль ее оси силой:

$$F_A = \pm \Delta F \cdot \cos \alpha. \quad (10)$$

Эта сила изменяет момент сухого трения в шарнире крепления спицы. Если принять широко используемую в инженерной практике зависимость момента сухого трения от угловой скорости относительного перемещения вращающихся при этом механических элементов в виде

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{стм}} \cdot \text{sign } \dot{\alpha}(t),$$

то влияние силы давления F_A на шарнир будет характеризоваться зависимостью

$$M_{\text{стм}} = M_{\text{ст0}} + M_{\text{стF}}(F_A), \quad (11)$$

в которой $M_{\text{ст0}}$ – уровень момента сухого трения в шарнире подвеса спицы при идеальном ее обезвешивании; $M_{\text{стF}}(F_A)$ – дополнительная составляющая уровня момента сухого трения в шарнире подвеса спицы при неидеальном ее обезвешивании и наличии давления на шарнир силой F_A , изменяющейся в зависимости от угла раскрытия спицы согласно рис. 2.

Порождаемый действием в шарнире спицы момент сухого трения требует для его нейтрализации в процессе раскрытия рефлектора с целью приближения этого процесса к аналогичному, протекающему в условиях невесомости, от привода раскрытия рефлектора дополнительных затрат энергии, равных

$$E(F_A) = \int_{T_{\text{рп}}}^{T_{\text{pp}}} M_{\text{стF}}(F_A) \cdot \omega_{c_i}(t) \cdot dt,$$

а для нейтрализации влияния его суммарного уровня у всех спиц рефлектора необходимы энергозатраты

$$E_{\Sigma}(F_A) = \sum_{i=1}^{N_c} \int_{T_{\text{рп}}}^{T_{\text{pp}}} M_{\text{стF}}(F_A) \cdot \omega_{c_i}(t) \cdot dt.$$

Уровень момента сухого трения $M_{\text{ст0}}$ в шарнире и зависимость $M_{\text{стF}}(F_A)$, входящие в (11), крайне затруднительно определить аналитически, и потому ее следует для каждого типа спиц рефлекто-

ра определять экспериментально. Для этого можно использовать, в частности, тот же стенд, на котором планируется проводить наземные испытания механических устройств рефлекторов антенн большого диаметра.

Для этого на стенде нужно выставить вертикально в транспортировочном, но расчехленном положении рефлектор антенны, установить на спицах хомуты для намотанных на шпулях кареток тросов вывески, закрепив их нижние концы в центрах масс спиц, предварительно определенных расчетным путем или (что лучше) экспериментально.

Следует также на концевой части включаемый в эксперимент спицы (на известном расстоянии от оси ее шарнирного соединения A с корпусом рефлектора) закрепить мягкий (например, кевларовый) трос, пропустить его через специально установленный блок и на другом его конце прикрепить чашу весов для гирь и добиться горизонтального положения этого троса на участке между спицей и блоком.

После этого следует привести в стенде систему активного обезвешивания в рабочий режим и полностью обезвесить спицу рефлектора, для которой планируется экспериментально определить $M_{\text{ст0}}$ и зависимость $M_{\text{стF}}(F_A)$. Затем нагружать чашу весов мерными гирьками до тех пор, пока спица не начнет поворачиваться. После этого, умножив вес чаши весов с гирьками на расстояние от центра сочленения спицы с корпусом аппарата до точки крепления на ней троса для весов, получим значение момента сухого трения $M_{\text{ст0}}$ при полностью обезвешенной спице.

В дальнейшем проделываем подобные действия для различных сил натяжения троса в пределах от G до нуля. В итоге получаем зависимость $M_{\text{стF}}(F_A)$ для этого интервала изменения F_A . Значение $M_{\text{стF}}(0)$ будет равно значению момента сухого трения в шарнире спицы при ее необезвешенном состоянии.

Необходимое для вычисления силы F_A по формуле (10) значение угла из-за отсутствия в составе рефлектора датчика этого угла можно оценить косвенно, если в приводе системы автоматического натяжения троса установить датчик угла поворота на валу ее приводного двигателя или на шпуле, на которую наматывается трос в процессе раскрытия спицы. По выходному сигналу этого датчика можно вычислять в процессе раскрытия спицы длину наматываемого на шпулю с момента начала раскрытия троса и, следовательно, текущее значение длины троса вывески L_{CK} (длины отрезка CK на рис. 2).

Если иметь и на выходном валу привода каретки датчик угла, то по его текущему показанию можно определять пройденное кареткой расстояние, а следовательно, L_{DK} , т.е. длину отрезка DK . Тогда в прямоугольном треугольнике $\triangle ADK$ можно определить длину гипотенузы, т.е. L_{AK} . В таком случае

становятся известными все стороны треугольника $\triangle ACK$, а значит, может быть вычислен угол $\angle ACK$, который лишь незначительно (на малый при работе COA угол β) отличается от искомого текущего угла раскрытия спицы α . Поэтому в формуле (10) можно использовать расчетное значение угла $\angle ACK$.

Заключение

В данной статье приведена методика оценки энергопотерь привода раскрытия рефлектора для случая, когда он раскрывается на стенде без оснастки его сетеполотном отражателя антенны и крепящих его на спицах средств. Если же стендовые испытания рефлектора будут проводиться при его полной оснастке, то центр масс каждой спицы и закрепленной на ней части сетеполотна в процессе раскрытия рефлектора будет менять свое положение. Добиться абсолютной инвариантности в работе приводов раскрытия рефлектора от общего веса спиц, сетеполотна и крепящих его на спицах средств при описанном варианте системы активного обезвешивания вряд ли возможно. Учет этого фактора в определении энергопотерь привода МВМ требует дополнительной проработки.

Имитация невесомости при наземных раскрытиях рефлекторов антенн необходима фактически лишь для исключения (точнее, минимизации) влияния веса спиц и закрепленных на них других элементов рефлектора на работу его привода раскрытия. В этой связи входящая в состав стенда система активного обезвешивания должна обеспечивать имитацию невесомости в наземных условиях при раскрытии рефлекторов антенн из транспортировочного положения в рабочее с потерей энергии механизмов раскрытия этих элементов в пределах не более 10 процентов. Такой уровень допустимых энергопотерь при наземных испытаниях механических устройств рефлекторов антенн на описанном в [15] стенде представляется достижимым.

Литература

1. Гряник М.В. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа / М.В. Гряник, В.И. Ломан. – М.: Радио и связь, 1987. – 72 с.
2. Tibert G.A. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications: PhD thesis. – Stockholm, 2002. – 220 p.
3. Томские ученые создают спутниковую «тарелку» размером с футбольное поле [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://obzor.westsib.ru/news/468175>, свободный (дата обращения: 02.10.2018).
4. Роботов-пауков научат ткать космические конструкции на орбите [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nanonewsnet.ru/news/2015/robotov-paukov-nauchat-tkat-kosmicheskie-konstruktsii-na-orbite>, свободный (дата обращения: 03.10.2018).
5. Natori M.C. Design and Development of a Deployable Mesh Antenna for MUSES-B Spacecraft / M.C. Natori, Tadahiko Takano, Toshio Inoue, Takahiko Noda / 34th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 93-1460. – 1993.
6. Im E. Prospects of Large Deployable Reflector Antennas for a New Generation of Geostationary Doppler Weather Radar Satellites / Eastwood Im, Mark Thomson, Houfei Fang and other. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2007-9917. – 2007.
7. Fang H. Mechanical Technology Development on a 35-m Deployable Radar Antenna for Monitoring Hurricanes / H. Fang, E. Im. NASA ESTO B6P2, Earth Science Technology Conference 2006. – Adelphi, Maryland, June 27–29, 2006. – 6 p.
8. Hedgepeth J.M. Design concepts for large reflector antenna structures / J.M. Hedgepeth, L.R Adams // Proc. SPIE 0383, Deployable Optical Systems, (1 December 1983); NASA Contractor Report 3663. – Washington, USA: NASA, 1983. – 82 p.
9. Chodimella S. Design Evaluation of a Large Aperture Deployable Antenna / S. Chodimella, J. Moore, J. Otto, H. Fang. AIAA-2006-1603 47th AIAA/ ASME/ ASCE/ AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Newport, Rhode Island, May 1–4, 2006.
10. Пат. 2350519 РФ. МПК В64G 1/22, H01Q 15/16. Развертываемый крупногабаритный рефлектор космического рефлектора / Н.А. Тестоедов (РФ), В.И. Халиманович (РФ), Г.В. Шипилов (РФ), А.В. Романенко (РФ), В.В. Шальков (РФ), А.И. Величко (РФ), В.П. Акчурин (РФ). Заявл. 03.06.2007, опубл. 27.03.2009. – Бюл. № 9. – 9 с.
11. Пат. 2382452 РФ. МПК H01Q 15/16, B64G 1/22. Развертываемый крупногабаритный рефлектор космического аппарата / В.П. Акчурин (РФ), А.И. Величко (РФ), Н.А. Тестоедов (РФ), В.И. Халиманович (РФ), Г.В. Шипилов (РФ). – Заявл. 08.12.2008, опубл. 20.02.2010.
12. Пат. 2659761 РФ. МПК H01Q 15/16. Зонтичная антенна космического аппарата / Ю.Н. Пономарев (РФ), В.В. Шальков (РФ), Г.В. Шипилов (РФ), В.И. Халиманович (РФ), В.П. Акчурин (РФ), М.Н. Леонтьев (РФ), А.Н. Тимофеев (РФ), А.В. Романенко (РФ). – Заявл. 03.07.2018.
13. Пат. 2427949 РФ. ИРК H01Q 15/16. Трансформируемая антенна зонтичного типа космического аппарата / Н.А. Тестоедов (РФ), В.В. Двирный (РФ), В.Е. Косенко (РФ), В.А. Бартев (РФ), В.И. Лавров (РФ), Р.Ф. Туркенич (РФ), С.М. Роскин (РФ), А.В. Анкудинов (РФ), Г.И. Овечкин (РФ), Г.В. Двирный (РФ), Л.В. Долгов (РФ), В.В. Голованова (РФ), Д.Е. Курбатов (РФ), А.И. Величко (РФ). – Заявл. 12.10.2009, опубл. 27.08.2011.
14. Пат. 2503102 РФ. МПК H01Q 15/16. Зонтичная антенна космического аппарата / Н.А. Тестоедов (РФ), В.И. Лавров (РФ), В.И. Халиманович (РФ), А.И. Величко (РФ), Г.В. Шипилов (РФ), А.В. Романенко (РФ), В.В. Шальков (РФ), М.Н. Леонтьев (РФ), Ю.Н. Пономарев (РФ), А.Н. Тимофеев (РФ), В.П. Акчурин (РФ). – № 2011139695/07; заявл. 29.09.2011, опубл. 27.12.2013. Бюл. № 36. – 15 с.
15. Автоматическая система обезвешивания крупногабаритных трансформируемых конструкций при раскрытии / А.Г. Верхогляд, С.Н. Макаров, В.М. Михалкин, М.Ф. Ступак, А.В. Шевляков // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 134–142.

Малышенко Александр Максимович

Д-р техн. наук, профессор отд. автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: 8 (382-2)-70-18-37
Эл. почта: mam@tpu.ru

Майков Степан Александрович

Аспирант отд. автоматизации и робототехники ИШИТР НИ ТПУ, инженер АО «Информационные спутниковые системы им. акад. М.Ф. Решетнёва»
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-965-917-04-80.
Эл. почта: sam10@tpu.ru

Malysenko A.M., Majkov S.A.

Methodology of relative energy usage evaluation for an opening drive of umbrella-type reflector antenna at ground tests on active gravity compensation system

This paper describes methodology of active gravity compensation system effectiveness evaluation during deployment process of large-sized umbrella-type reflector antenna (up to 12 meters in diameter) at ground tests of mechanical devices, which allows to simulate their weightlessness. Basic principle of this method is to evaluate the amount of energy usage for an opening drive relative to deployment process uncertainties in gravity compensation of reflector antenna spokes.

Keywords: reflector antennas, ground testing, mechanical devices, stand with active weightlessness system, mechanism for nominating mast drive disclosure, relative energy consumption.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-123-129

References

1. Grianik M.V., Loman V.I. *Razvertivaemye zerkal'nye anteny zontichnogo tipa* [Deployable umbrella-type mirror antennas]. Moscow, Radio and Communication, 1987. 72 p.
2. Tibert G.A. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications: PhD thesis. Stockholm, 2002. 220 p.
3. *Tomskie uchenye sozdajyt sputnikovuju «tareлку» raz-merom s futbol'noe pole* [Scientists from Tomsk create a football field size umbrella-type antenna]. [Electronic resource]. URL: <http://obzor.westsib.ru/news /468175>, free (accessed: September 16, 2018).
4. *Robotov-paukov nauchat tkat' kosmicheskie konstrukcii na orbite* [Spider robots would learn how to weave space structures in orbit]. [Electronic resource]. URL: <http://texnomaniya.ru/robotov-paukov-nauchat-tkat-kosmicheskie-konstrukcii-na-orbite>, free (accessed: September 28, 2018).
5. Natori M.C., T. Tadashi, I. Toshio, N. Takahiko. Design and Development of a Deployable Mesh Antenna for MUSES-B Spacecraft. 34th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 93-1460, 1993.
6. Im E., Thomson M., Fang H. and other. Prospects of Large Deployable Reflector Antennas for a New Generation of Geostationary Doppler Weather Radar Satellites. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2007-9917. 2007.
7. Fang H., Im E. Mechanical Technology Development on A 35-m Deployable Radar Antenna for Monitoring Hurricanes. NASA ESTO B6P2, Earth Science Technology Conference, Adelphi, Maryland, June 27–29, 2006. 6 p.
8. Hedgepeth J.M., Adams L.R. Design concepts for large reflector antenna structures. Proc. SPIE 0383, Deployable Optical Systems, (December 01, 1983); NASA Contractor Report 3663. Washington, United States, NASA, 1983. 82 p.

9. Chodimella S., Moore J., Otto J., Fang H. Design Evaluation of a Large Aperture Deployable Antenna. AIAA-2006-1603 47th AIAA/ ASME/ ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Newport, Rhode Island, May 1–4, 2006.

10. Testoedov N.A., Khalimanovich V.I., Shipilov G.V., Romanenko A.V., Velichko A.I., Shal'kov V.V., Akchurin V.P. *Razvertivaemyi krupnogabaritnyi refleksor kosmicheskogo apparata*. [Large-size deployable reflector antenna of the spacecraft]. Patent RF, no. 2350519, 2007.

11. Akchurin V.P., Testoedov N.A., Velichko A.I., Khalimanovich V.I., Shipilov G.V. *Razvertivaemyi krupnogabaritnyi refleksor kosmicheskogo apparata* [Large-size deployable reflector antenna of the spacecraft]. Patent RF, no. 2382452, 2008.

12. Khalimanovich V.I., Shipilov G.V., Romanenko A.V., Shal'kov V.V., Leont'ev M.N., Ponomarev Ju. N., Timofeev A.N., Akchurin V.P. *Zontichnaja antena kosmicheskogo apparata* [An umbrella antenna the spacecraft]. Patent RF, no. 2659761, 2018.

13. Testoedov N.A., Dwirnyi V.V., Kosenko V.E., Bartenev V.A., Lawrow V.I., Turkenich R.P., Roskin S.M., Ovechkin G.I., Ankudinov A.V., Dwirnyi G.V., Dolgow L.V., Golowanowa V.V., Kurbatov D.E., Velichko A.I. *Transvorniruemaja antena zontichnogo tipa kosmicheskogo apparata* [Transformable umbrella-type antenna of the spacecraft]. Patent RF, no. 2427949, 2009.

14. Testoedov N.A., Lawrov V.I., Khalimanovich V.I., Velichko A.I., Shipilov G.V., Shal'kov V.V., Leont'ev M.N., Romanenko A.V., Ponomarev Ju. N., Timofeev A.N., Akchurin V.P. *Zontichnaja antena kosmicheskogo apparata* [An umbrella-type antenna of the spacecraft]. Patent RF, no. 2503102, 2011.

15. Verhogljad A.G., Makarov S.N., Mihalkin V.M., Stupak M.F., Shevlyakov A.V. *Avtomaticheskaya sistema obezweshiwaniya krupnogabaritnykh transvorniruemykh konstruktsiy pri raskrytii* [Automatic gravity compensation system for large-size transformable constructions during deployment] / News universities. Instrumentation, 2016, vol. 59, no. 2, pp. 134–142.

Aleksandr M. Malysenko

Doctor of Engineering, Professor
Department of Automation and Robotics,
Engineering School of Information Technology and Robotics,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2)-70-18-37
Email: mam@tpu.ru

Stepan A. Majkov

Postgraduate Student,
Department of Automation and Robotics,
Engineering School of Information Technology and Robotics,
National Research Tomsk Polytechnic University,
Engineer of JS company «Information Satellite Systems
named after Academician M.F. Reshetnev».
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-965-917-04-80
Email: sam10@tpu.ru

Требования к подготовке рукописей статей,

представляемых для публикации в журнале

«Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»

1. Электронный вариант статьи должен быть представлен в виде файла, названного по-русски фамилией первого автора, на дискете или диске в формате Word 2003. 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 *непериодических 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

