



Доклады ТУСУР. 2020 • Том 23, № 1

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442



ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

2020 • Том 23, № 1



9 771818 044708 02007



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
2020, том 23, № 1**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

В.М. Рулевский, к.т.н., доцент, ректор ТУСУРа, научный руководитель направления НИИ АЭМ ТУСУРа, Томск, Россия (*гл. редактор*).
А.А. Шелупанов, д.т.н., проф., президент ТУСУРа, заслуженный работник высшей школы РФ, почётный работник науки и техники РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования, дважды лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2393-6701> (*зам. гл. редактора*).
А.Г. Лоцилов, к.т.н., доцент, проректор по научной работе и инновациям, зав. каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, ТУСУР, Томск, Россия (*зам. гл. редактора*).
В.Н. Масленников, к.т.н., доцент, ТУСУР, Томск, Россия (*отв. секретарь*).

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

Ян Браун (Jan G. Brown), PhD, Национальная лаборатория им. Лоуренса, Беркли, Калифорния, США.
С.А. Гаврилов, д.т.н., проф., проректор по НР, НИУ «Московский институт электронной техники» (МИЭТ), лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-2967-272X>.

Ю.П. Ехлаков, д.т.н., проф., проф. каф. автоматизации обработки информации, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, почётный работник высшего профессионального образования РФ, Томск, Россия.
В.М. Исаев, д.т.н., первый заместитель директора, Мытищинский НИИ радиоизмерительных приборов, почётный работник науки и техники РФ, почётный работник электронной промышленности, Мытищи, Московская обл., Россия.
А.В. Кобзев, д.т.н., проф., проф. каф. промышленной электроники, ТУСУР, Томск, Россия, почётный работник науки и техники РФ, почётный работник высшего профессионального образования России, Томск, Россия.

А.М. Кориков, д.т.н., проф., зав. каф. автоматизированных систем управления, ТУСУР, заслуженный деятель науки РФ, почётный работник науки и техники РФ, почётный работник высшего профессионального образования РФ, Томск, Россия.
Ю.Н. Кульчин, д.ф.-м.н., академик РАН, директор, ФГБУН «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН», Владивосток, Россия.

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

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

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

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

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

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

А.Р. Сафин, к.т.н., доц., НИУ «МЭИ», Москва, Россия.
П.Е. Троян, д.т.н., зав. каф. физической электроники, ТУСУР, почётный работник высшего профессионального образования РФ, почётный работник науки и техники РФ, Томск, Россия.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Корректор В.Г. Лихачева.

Подписано в печать 25.03.2020.

Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 9,4. Тираж 500. Заказ 4.

Editorial board

Viktor M. Rulevskiy	Editor in Chief, Rector of TUSUR University, Scientific adviser at the Research Institute of Automation and Electromechanics (RI AEM) TUSUR, Candidate of Engineering.
Alexander A. Shelupanov	Deputy Editor in Chief, President of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor, Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Laureate of the Russian Federation Government Prize in Education, Twice Laureate of the Russian Federation Government Prize in Science and Technology, Tomsk, Russia, https://orcid.org/0000-0003-2393-6701 .
Anton G. Loschilov	Deputy Editor in Chief, Vice-Rector for Research and Innovations of TUSUR University, Head of the Department of design of components and parts of electronic equipment, TUSUR University, Candidate of Engineering.
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	Professor 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.
Sergey D. Odintsov	International Member of the Norwegian Academy of Science and Letters, Professor at Institute of Space Sciences, Barcelona, Spain, Doctor of Physics and Mathematics, 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.
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.
Ilya A. Khodashinsky	Professor at Department of Complex Information Security of Computer Systems, TUSUR University, Leading Researcher at Laboratory of Medical and Biological Studies (LBMS), Tomsk, Russia, Doctor of Engineering, Professor.
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, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Денисов В.П., Дубинин Д.В., Ерофеев Д.В. Анализ разрешающей способности обзорных фазовых радиопеленгаторов	7
Разумихин А.С., Лайко К.А., Филимонова Ю.О. Пути снижения уровня боковых лепестков в щелевых антенных решетках	15
Фаерман В.А., Аврамчук В.С. Алгоритмическое обеспечение корреляционного течеискателя, функционирующего в режиме реального времени	20

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Авсентьев О.С., Кругов А.Г., Шелупанова П.А. Функциональные модели процессов реализации угроз утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений объектов информатизации	29
Ефремова А.Е., Парашинец А.В. Протокол маршрутизации RASeR для беспроводных самоорганизующихся сенсорных сетей	40
Грибков Е.И., Ехлаков Ю.П. Нейросетевая модель на основе системы переходов для извлечения составных объектов и их атрибутов из текстов на естественном языке	47
Разумников С.В. Планирование развития облачной стратегии на основе применения многокритериальной оптимизации и метода STEM	53
Евсюткин И.В., Марков Н.Г. Управление геолого-техническими мероприятиями на месторождениях нефти и газа с использованием искусственных нейронных сетей	62
Кагаев М.Ю., Кислов А.В., Самохин Е.А. Оценка состояния хвойных растений методами компьютерного зрения	70
Исаков А.М., Исакова А.И., Кориков А.М. Формирование компетенций студентов на основе взаимодействия университета с работодателями	76

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Андреев Ю.А., Буров С.Ю., Кремзуков Ю.А. Проблемы защиты системы электроснабжения космических аппаратов от короткого замыкания при наземных испытаниях	85
Титовский С.Н., Титовская Т.С., Титовская Н.В., Средкин В.Г. Влияние цифрового представления данных в контуре управления на работу импульсного стабилизатора напряжения	92
Рахим А.А.Р., Кладиев С.Н., Саиди С. Имитационное исследование системы управления шестифазным синхронным двигателем с постоянными магнитами на основе прогнозирующей модели	97
Зарва Д.Б., Ли А.М., Павлов В.М., Батырбеков Э.Г., Дериглазов А.А. Имитационное моделирование системы импульсного электропитания токамака КТМ	105
Требования	112

ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Denisov V.P., Dubinin D.V. Erofeev D.V. Analysis of the resolution of panoramic phase direction finder	7
Razumikhin A.S., Layko K.A, Philimonova Yu.O. Ways to reduce the level of side lobes in slot antenna arrays	15
Faerman V.A., Avramchuk V.S. Algorithms for real-time leak noise correlator	20

CONTROL, COMPUTER SCIENCE, AND INFORMATICS

Aysentev O.S., Krugov A.G, Shelupanova P.A. Functional models of processes for implementing information leakage threats due to side electromagnetic radiation of informatization objects	29
Efremova A.E., Parashchinec A.V. Routing protocol RASeR for wireless self-organizing sensor network	40
Gribkov Yu.P., Ehlakov E.I. Transition-based neural network model for extracting composite objects and their attributes from natural language texts	47
Razumnikov S.V. Cloud strategy development planning based on multi-criteria optimization and STEM method	53
Evsyutkin I.V., Markov N.G. Management of geological and technical arrangements on oil-and-gas fields with the use of artificial neural networks.....	62
Kataev M.Yu., Kislov A.V., Samokhin E.A. Estimation of coniferous plants state using computer vision methods	70
Isakov A.M., Isakova A.I., Korikov A.M. Developing students' competencies by interaction between the university and employers	76

ELECTRICAL ENGINEERING

Andreev Y.A., Burov S.Y., Kremzukov Y.A. Problems of protecting the spacecraft power supply system from short circuit during ground tests of the spacecraft.....	85
Titovskii S.N., Titovskaya T.S., Titovskaia N.V., Seryodkin V.G. Influence of digital data representation in control circuit on pulse voltage stabilizer	92
Rahim A.A.R., Kladiev S.N., Saeidi S. Simulation study of a six-phase permanent magnet synchronous motor control system based on a predictive model	97
Zarva D.B., Lee A.M., Pavlov V.M., Batyrbekov E.G., Deriglazov A.A. Simulation Modeling of Pulse Power Supply System of Kazakhstani Material Testing Tokamak KTM.....	105
Manuscript requirements	112

**ЭЛЕКТРОНИКА,
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

УДК 621.396.41

В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, Д.В. Ерофеев

Анализ разрешающей способности обзорных фазовых радиопеленгаторов

Показано, что угловое разрешение источников сигналов в фазовых пеленгаторах с антенными системами в виде линейных решеток из слабонаправленных элементов достигается путем определения для каждого из сигналов («сильного» и «слабого») своего набора полных периодов разностей фаз, утраченных при измерениях. Показаны реализуемость углового разрешения методом максимального правдоподобия, общность его оснований с методом «суммирования косинусоид». Даны оценки точности пеленгования принимаемых сигналов.

Ключевые слова: разность фаз, разрешающая способность, метод максимального правдоподобия.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-7-14

Рассматривается угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов, т.е. способность одновременно пеленговать два или более источника радиоизлучения. Фазовый пеленгатор, понимаемый в традиционном смысле [1], разрешающей способностью не обладает. Целью данной работы является применение метода максимального правдоподобия в решении задачи углового разрешения сигналов, сравнение его с известным методом «суммирования косинусоид». Придание фазовым пеленгаторам свойства углового разрешения существенно расширяет область их применения.

Простейшая структурная схема фазового пеленгатора приведена на рис. 1. Предполагается, что элементы антенной системы слабонаправленные, так что могут одновременно принимать сигналы из широкого сектора обзора.

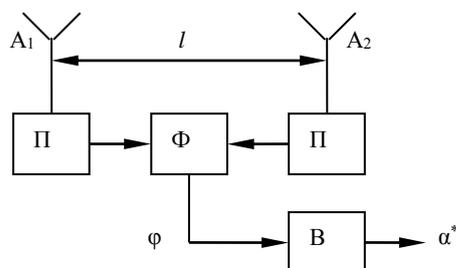


Рис. 1. Простейший фазовый радиопеленгатор:
A₁, A₂ – антенны, П – приемники, Ф – фазометр,
В – вычислитель

Разность фаз сигналов φ на антеннах пеленгатора и угол прихода α на пеленгатор плоской волны связаны известным соотношением

$$\Phi = \varphi + 2\pi k = 2\pi \frac{l}{\lambda} \sin \alpha, \quad (1)$$

где Φ – полная разность фаз; l – расстояние между фазовыми центрами антенн (фазометрическая база); λ – длина волны; k – число полных периодов разности фаз, утрачиваемых при фазовых измерениях.

В обзорных фазовых пеленгаторах отыскание k (разрешение неоднозначности фазовых измерений) производится путем применения ряда разнесенных антенн и последующей обработки совокупности

измеренных разностей фаз. Разные подходы к разрешению неоднозначности фазовых измерений можно найти в [2–5].

Схожесть терминов «угловое разрешение» и «разрешение неоднозначности измерений» заставляет нас подчеркнуть, что предмет рассмотрения статьи – угловая разрешающая способность фазовых пеленгаторов. Вопросы разрешения неоднозначности фазовых измерений затрагиваются в свете решения поставленной задачи.

Вопросы угловой разрешающей способности радиопеленгаторов с антенными решетками широко обсуждаются в литературе, причем акценты делаются на сверхразрешение. Алгоритмы сверхразрешения основаны на вычислении корреляционной матрицы сигналов с выходов элементов решетки [7]. Для реализации такой возможности приемные тракты должны быть линейными, чтобы не исказить фазовые и амплитудные соотношения сигналов. По существу, это поисковые по углу алгоритмы, так как они требуют проверки наличия или отсутствия сигнала в каждом элементе углового разрешения путем проведения объемных матричных вычислений.

В фазовых пеленгаторах линейность приемных трактов не требуется. Как правило, они включают в себя ограничители сигналов по амплитуде для увеличения точности фазовых измерений. Кроме того, обзорные фазовые пеленгаторы беспойсковые по углу. Указанные особенности фазовых пеленгаторов приводят к их широкому применению в системах радиоэлектронной борьбы [8, 9]. Придание фазовым пеленгаторам свойства углового разрешения улучшает их оперативные возможности. Реально угловое разрешение проявляется в способности пеленгования сигналов, одновременно попадающих в полосу пропускания приемника.

Предположим, что антенная система пеленгатора представляет собой линейную решетку из N элементов и на ней образовано $n = N - 1$ фазометрических баз, как показано на рис. 2.

Существует два принципиально разных подхода к обработке совокупности разности фаз $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, измеренных на антенной системе. Первая заключается в том, что пеленг на источник ра-

диоизлучения (ИРИ) определяется с использованием формулы (1), где l – самая большая база из имеющихся. Все остальные измерения используются только для устранения неоднозначности.

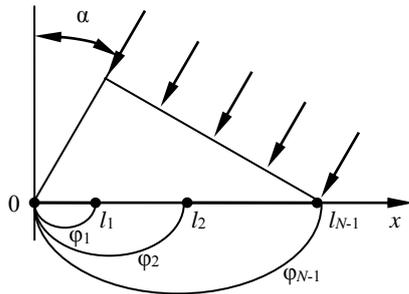


Рис. 2. Антенная система пеленгатора

Очевидно, в отношении угловой разрешающей способности такой пеленгатор эквивалентен двухканальному, построенному по схеме рис. 1, и угловой разрешающей способностью не обладает. Имея его в виду, авторы книги [1] утверждают, что многошкальные системы можно применять там, где исключено появление двух или более сигналов.

Второй подход заключается в том, что как устранение неоднозначности фазовых измерений на каждой из баз, так и последующее вычисление пеленга производится по всей совокупности измеренных разностей фаз. Этот подход развит на основе принципа максимального правдоподобия в предположении, что фазовые погрешности подчиняются многомерному нормальному закону распределения с известной корреляционной матрицей [2, 3]. После устранения неоднозначности измерений пеленг вычисляется по формуле

$$v = \sum_{i=1}^n q_i \Phi_i = \sum_{i=1}^n q_i (\varphi_i + 2\pi k_i), \quad (2)$$

где $v = \sin \alpha$ – направляющий косинус приходящей волны по отношению к оси x (рис. 2); n – число фазометрических баз; Φ_i – полная разность фаз на базе l_i ; φ_i – измеренная разность фаз на базе l_i ; $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ – вектор весов, зависящий от структуры антенной системы и корреляционной матрицы фазовых погрешностей [3].

Предположим, что на антенную систему приходят сигналы от двух (или более) источников радиоизлучения (ИРИ). Они создают единую совокупность измеренных разностей фаз $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, входящую в формулу (2). Разрешение сигналов возможно за счет определения для каждого из них своего набора полных периодов разностей фаз на фазометрических базах k_1, k_2, \dots, k_n и последующих вычислений по формуле (2).

Пусть на антенную систему пеленгатора (см. рис. 2), падают две плоские одинаково поляризованные волны одной частоты под углами α_1 и α_2 к нормали. Воспользовавшись формулами для фазы результирующего сигнала в точке x антенной ре-

шетки [3], определим разность фаз сигналов на произвольной базе l_i

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} l_i v_1 + \operatorname{arctg} \frac{2R \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}{1 + 2R \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right]} \times \frac{\cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right] + R^2 \sin \left[\frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}{\cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right] + R^2 \cos \left[\frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}, \quad (3)$$

где $v_1 = \sin \alpha_1$, α_1 – угол прихода первой волны; $v_2 = \sin \alpha_2$, α_2 – угол прихода второй волны; $R = \frac{U_2}{U_1}$ – отношение амплитуд волн; γ – разность фаз приходящих волн на антенне A_0 .

Будем считать, что амплитуда первой волны всегда больше, чем второй, так что $U_2/U_1 < 1$. Случай равенства амплитуд не рассматривается как маловероятный.

Формула (3) представляет разность фаз сигналов на базе l_i в виде суммы двух слагаемых.

$$\Phi_i = \Phi_{li} + \Delta\Phi_i. \quad (4)$$

Первое слагаемое $\Phi_{li} = \frac{2\pi}{\lambda} l_i v_1 = \varphi_i + 2\pi k_i$ – разность фаз, которую создавал бы на базе l_i более сильный сигнал, если бы он был один, $|\varphi_i| < \pi$.

Второе слагаемое $\Delta\Phi_i$ состоит из целого числа периодов разности фаз $2\pi \cdot \Delta k_i$ и дробной части периода

$$\Delta\varphi_i = \operatorname{arctg} \frac{2R \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}{1 + 2R \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right]} \times \frac{\cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right] + R^2 \sin \left[\frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}{\cos \left[\frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right] + R^2 \cos \left[\frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}. \quad (5)$$

Это слагаемое зависит от базы l_i разности пеленгов источников радиоизлучения $v_2 - v_1$ и разности фаз сигналов γ этих источников на антенне A_0 . По предположению $R < 1$, так что аргумент арктангенса с учетом возможных знаков числителем и знаменателем формулы (5) не превосходит $\pm\pi$.

Заметим, что разность фаз γ может быть постоянной, если излучения пеленгуемых источников когерентны. Такая ситуация возможна, когда пеленгуется так называемая «парная цель», специально организованная в процессе РЭБ [10]. Для пеленгаторов, работающих в системах радиомониторинга или радиотехнической разведки, более вероятна ситуация, когда пеленгуются независимые источники, и,

следовательно, их излучения некогерентны. Практически это означает, что разность фаз γ – случайная величина, изменяющаяся во времени, распределенная равномерно на интервале $\pm\pi$.

Заметим, что классические критерии разрешения (Рэлея, Вудворда) сформулированы для некогерентных источников сигналов [11].

В настоящее время для расчета пеленга по совокупности разностей фаз, измеряемых между элементами антенной системы, находит применение метод максимального правдоподобия, разработанный для условий, когда на вход пеленгатора поступает одна плоская волна, а погрешности измерения разности фаз случайны и подчиняются нормальному закону распределения. Выясним, пригоден ли этот метод для разрешения сигналов.

Если на входе пеленгатора одна плоская волна, а фазовые погрешности на базах независимы и имеют равные дисперсии σ_φ^2 , функция правдоподобия

$L_\varphi(v_1)$ имеет вид

$$L_\varphi(v_1) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \right)^2 \cdot \exp \left\{ -\sum_{i=1}^n \frac{(\varphi_i + k_i - n_{xi}v_1)^2}{2\sigma_\varphi^2} \right\}, \quad (6)$$

где φ_i выражаются в рад/2 π , $n_{xi} = l_i / \lambda$.

Для наглядного представления вида функции правдоподобия предположим, что истинное значение синуса пеленга $v_1 = 0$, разность фаз на базах равна нулю. Последнее предположение означает, что в конкретной совокупности измеренных разностей фаз φ_i погрешности измерений отсутствуют. При сделанных допущениях целое число периодов разностей фаз в формуле (6) на измерительных базах

$$k_i = [n_{xi}v_1],$$

где символ $[\bullet]$ означает округление до ближайшего целого.

Функцию правдоподобия (6) можно записать в виде

$$L_\varphi(v_1) = K \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_\varphi^2} \cdot p(v_1) \right\}, \quad (7)$$

где $p(v_1) = \sum_{i=1}^n (n_{xi}v_1 - [n_{xi}v_1])^2$ – показатель степени.

На рис. 3, а показан показатель степени $p(\varphi, v_1)$ формулы (7), являющийся достаточной статистикой функции правдоподобия, а на рис. 3, б – функция правдоподобия $L_\varphi(v_1)$ для антенной решетки с

носительными базами $n_{x1} = \frac{l_1}{\lambda} = 1$, $n_{x2} = \frac{l_2}{\lambda} = 2$,

$n_{x3} = \frac{l_3}{\lambda} = 3$. Кривая рис. 3, б так же, как и другие

изображения функции правдоподобия в данной статье, нормирована к максимальному значению. Видно, что как один, так и другой график имеют экстремумы, точно соответствующие $v_1 = 0$.

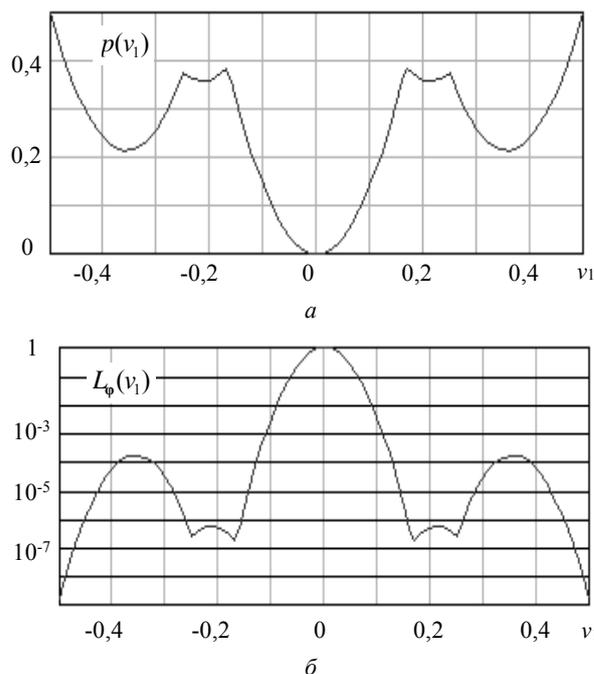


Рис. 3. Показатель степени функции правдоподобия (7), $\mathbf{n}_x = (1, 2, 3)$, $v_1 = 0$ – а; функция правдоподобия (7), $\mathbf{n}_x = (1, 2, 3)$, $v_1 = 0$ – б

В дальнейшем для краткости письма структуру баз будем задавать вектор-строкой \mathbf{n}_x . В данном случае $\mathbf{n}_x = (1, 2, 3)$.

Применим изложенный подход к ситуации, когда на входе пеленгатора присутствует две плоские волны, так что разность фаз на базах определяется формулой (3). Запишем функцию правдоподобия синуса пеленга более сильного сигнала v_1 , считая синус пеленга второго сигнала, разность фаз сигналов γ и отношение амплитуд R фиксированными параметрами.

При таком подходе добавка $\Delta\Phi_i$ к измеряемой разности фаз формально выступает как погрешность измерений угла прихода более сильного сигнала.

Как и ранее, будем считать, что погрешности фазовых измерений распределены по нормальному закону с равными дисперсиями σ_φ^2 и не коррелированы от канала к каналу. Получим

$$L_\varphi(v_1) = K \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_\varphi^2} \cdot p(\varphi, v_1) \right\}, \quad (8)$$

где

$$p(\varphi, v_1) = \sum_{i=1}^n (n_{xi}v_1 + \Delta\varphi_i - \Phi_i - [n_{xi}v_1 + \Delta\varphi_i - \Phi_i])^2;$$

$\Delta\varphi_i$ определяется формулой (5), в которой v_1 – текущее значение синуса пеленга более сильного сигнала; Φ_i определяется формулой (3), в которой v_1 – истинное значение параметра, $[\bullet]$ означает округление до ближайшего целого.

На рис. 4, *a*, *б* показан показатель степени $p(\varphi, v_1)$ функции (8) и функции правдоподобия $L_{\varphi}(v_1)$, вычисленный для антенной решетки $\mathbf{n}_x = (1, 2, 3)$, $v_1 = 0$, $v_2 = 1/3$, $\gamma = 0$. Разнос источников $v_2 - v_1 = 1/3$ соответствует Рэлеевскому критерию разрешения для данной антенной решетки.

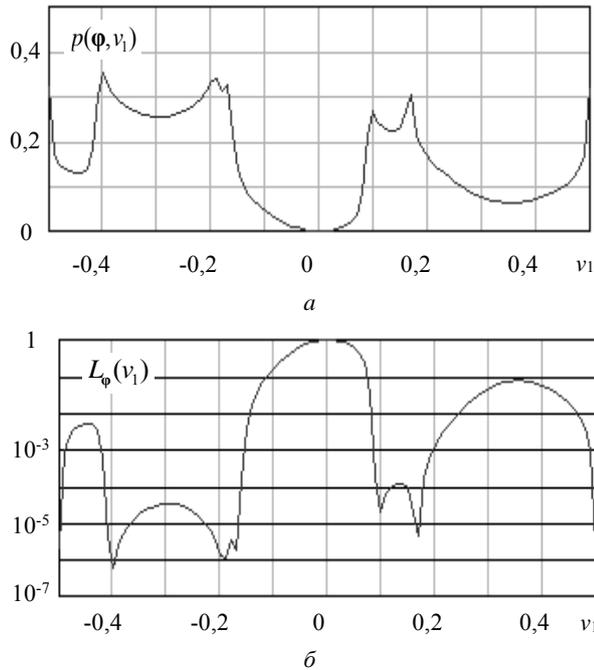


Рис. 4. Показатель степени функции правдоподобия (8), $\mathbf{n}_x = (1, 2, 3)$, $v_1 = 0$, $v_2 = 1/3$, $\gamma = 0$, $R = 0,9$ – *a*; функция правдоподобия (8), $\mathbf{n}_x = (1, 2, 3)$, $v_1 = 0$, $v_2 = 1/3$, $\gamma = 0$, $R = 0,9$ – *б*

Видно, что как один, так и другой график имеют четкие экстремумы, соответствующие положению целей. В обоих случаях экстремумы значительно превышают боковые лепестки функции правдоподобия, сигналы разрешаются. Таким образом, метод максимального правдоподобия, оптимальный для оценки угла прихода единственного сигнала на входе пеленгатора, оказался работоспособным и для случая, когда сигналов два, и способен их разрешать.

Функция правдоподобия (8) существенно зависит от разности начальных фаз сигналов γ . Чтобы подчеркнуть данную зависимость, запишем $L_{\varphi}(v_1) = L_{\varphi}(v_1, \gamma)$. В приведенных построениях мы полагали $\gamma = 0$, тогда сигналы разрешаются. При некоторых других значениях γ разрешение отсутствует. Для устранения зависимости функции правдоподобия от γ усредним ее по γ , считая эту величину распределенной равномерно на интервале $[-\pi, \pi]$.

$$\overline{L_{\varphi}(v_1)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} L_{\varphi}(v_1, \gamma) d\gamma. \quad (9)$$

Черта над $L_{\varphi}(v_1)$ в левой части равенства означает усреднение.

На рис. 5 приведена функция (9), рассчитанная для тех же значений v_1, v_2, R , что и график рис. 4, *б*. Усреднение выполнено численным методом по 100 значениям γ , равномерно распределенным на интервале $[-\pi, \pi]$.

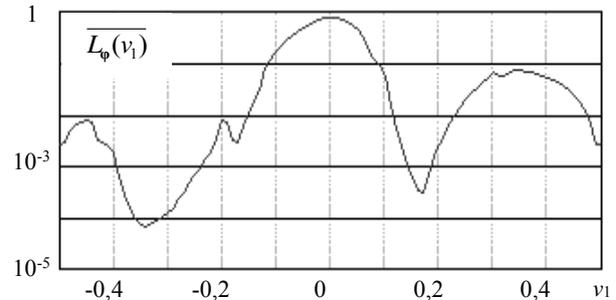


Рис. 5. Усредненная по γ функция правдоподобия $L_{\varphi}(v_1)$, $\mathbf{n}_x = (1, 2, 3)$, $v_1 = 0$, $v_2 = 1/3$, $\gamma = 0$, $R = 0,9$

Видно, что усредненная функция имеет четкие максимумы, соответствующие положению обеих целей. Сигналы разрешаются.

Приведенные выкладки и графики показывают принципиальную возможность использования функции правдоподобия более сильного сигнала для углового разрешения. Однако достаточно быстродействующий алгоритм практической реализации такой возможности пока не разработан.

Покажем, что некоторые характеристики разрешения сигналов на основе функции правдоподобия близки к получаемым при обработке сигналов методом «суммирования косинусов» [2]. Его разрешающая способность рассмотрена в статье [14], а пример практической реализации с учетом необходимости усреднения по разности начальных фаз γ – в монографии [3].

При наличии на входе пеленгатора одной волны пеленг находится по максимуму суммы

$$S_{\varphi}(v) = \sum_{i=1}^n A_0 \cos(2\pi \cdot n_{xi} v - \varphi_i), \quad (10)$$

где φ_i – разность фаз на i -й базе.

Функция правдоподобия $L_{\varphi}(v)$ и «сумма косинусов» имеют одинаковую структуру. Действительно, если $\varphi_i = 0$, то с учетом неоднозначности фазовых измерений функция правдоподобия выражается формулой (7). На рис. 6, *a* показано изменение сомножителей функции (7) в зависимости от v_1

$$v(v_1) = K \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{\varphi}^2} (n_{xi} v_1 - [n_{xi} v_1])^2 \right\}. \quad (11)$$

На рис. 6, *б* одно из гармонических слагаемых функции (10) соответствующего масштаба

$$S_1(v_1) = A_0 \cdot \cos(2\pi \cdot n_{x1} v_1). \quad (12)$$

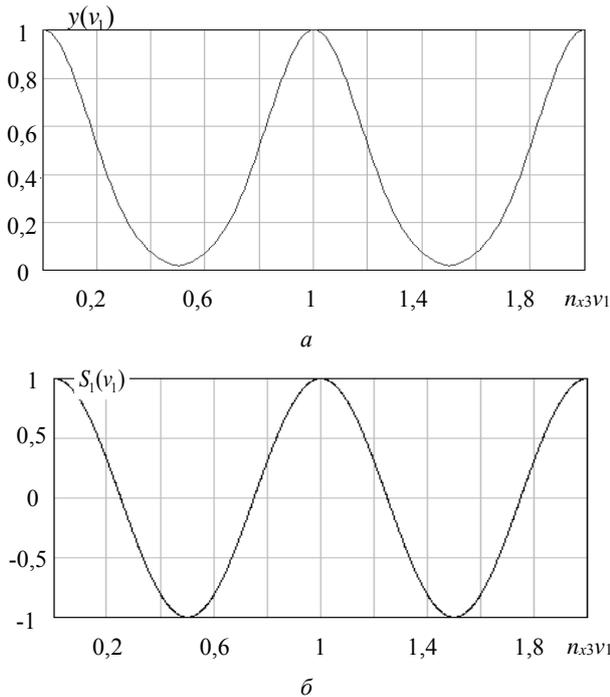


Рис. 6. Один из сомножителей функции правдоподобия (7) $n_{x3} = 3 - a$; одно из гармонических слагаемых функции (10) $n_{x3} = 3 - b$

Положение максимумов и минимумов функций на оси v_1 совпадает. Заметим, что в области максимумов, там, где справедливо разложение

$$\cos(2\pi n_{xi} v) = 1 - (2\pi n_{xi} v)^2,$$

сумма косинусоид точно аппроксимирует показатель степени функции правдоподобия (7). Вследствие этого «сумма косинусоид» (10) обеспечивает получение оптимальной оценки пеленга при условии, что сигнал на входе один [2].

Основное различие заключается в том, что $S_1(v_1)$ (12) имеет отрицательные полуволны, а функция $y(v_1)$ (11) их не имеет. В связи с этим различаются и функции $L_\varphi(v)$ (7), и «сумма косинусоид». На рис. 7 показана «сумма косинусоид» (10) для тех же условий, для которых построены графики (см. рис. 3, 4). Различие в области минимумов весьма значительно. Вместе с тем положение целей определяется по максимумам функций, которые формируются похожими компонентами и расположены в одних и тех же точках на оси v .

Поэтому по данным, полученным с помощью «суммы косинусоид», можно судить о характеристиках разрешения методом максимального правдоподобия.

«Сумма косинусоид» помимо основного лепестка имеет побочные, меньшие основного. Эти лепестки образуются путем суммирования «косинусоид», максимумы которых расположены симметрично справа и слева от него.

Положение побочного максимума относительно главного найдем по формуле (2).

$$\Delta v = \sum_{i=1}^n q_i (\varphi_i + k_i),$$

где $|\varphi_i| \leq 0,5$.

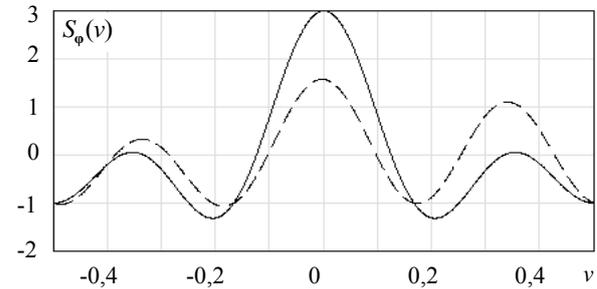


Рис. 7. «Сумма косинусоид» при воздействии: — — — — — одного сигнала на входе, $v_1 = 0$; — — — — — двух сигналов на входе, $v_1 = 0, v_2 = 1/3$

При суммировании оказывается, что в побочных максимумах дробные части полной разности фаз почти полностью компенсируются $\sum_{i=1}^n q_i \varphi_i \approx 0$.

Так что

$$\Delta v = \sum_{i=1}^n q_i k_i, \tag{13}$$

То есть положение каждого побочного максимума соответствует определенному набору целых чисел, которые в монографии [3] названы векторами неоднозначности \mathbf{k}_i . Данное утверждение распространяется на минимумы «суммы косинусоид» и побочные максимумы функции правдоподобия. Поскольку в статье оно строго не доказано, проверим его выполнение на конкретном примере. Для примера возьмем одиннадцатибазовый пеленгатор с эквидистантной антенной решеткой $\mathbf{n}_x = (1, 2, 3, \dots, n)$, рассматриваемый в [3]. Из приведенного в ней рисунка следует, что первый побочный максимум «суммы косинусоид» расположен в точке $v = 0,107$, первый минимум в точке $v = 0,152$, третий минимум в точке $v = 0,326$.

Векторы неоднозначности, соответствующие данным экстремумам,

$$\mathbf{k}_1 = (0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1), \mathbf{k}_2 = (0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2), \mathbf{k}_3 = (0, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 4).$$

Весовые коэффициенты в (2) для данной антенной решетки вычисляются по формуле [3]

$$q_i = \frac{i}{\sum_{i=1}^n i^2}.$$

Вычисления дают: первый максимум $v_1 = 0,1085$, первый минимум $v_1 = 0,149$, третий минимум $v_1 = 0,329$. Расхождение расчетных и гипотетических значений не превышает 1,5%. Расхождение объясняется тем, что метод «суммирования

косинусоид» неточно реализует алгоритм (13) в силу нелинейности слагаемых.

При наличии на входе пеленгатора двух сигналов более слабый из них мало влияет на точность пеленгования более сильного, что следует из формулы (2). Полученные соотношения позволяют оценить точность пеленгования более слабой из разрешаемых целей. Учтем, что главный максимум функции правдоподобия («суммы косинусоид») всегда соответствует положению более сильной цели. Предположим, что «слабая» цель отстоит от более сильной на целое число интервалов между главным максимумом суммы косинусоид и одним из побочных максимумов (минимумов), когда цель одна. В этом случае погрешность пеленгования вообще отсутствует. В силу соотношения (2) максимальная погрешность пеленгования «слабой» цели при ее произвольном положении на оси v_1 равна половине интервала между соседними максимумом и минимумом.

Рассмотрим пеленгатор с эквидистантной антенной решеткой и вектором баз $\mathbf{n}_x = (1, 2, 3, \dots, n)$. Если на такой пеленгатор воздействует одна плоская волна, «сумма косинусоид» описывается формулой [13]

$$S_\varphi(v_1) = n \cdot \cos[(n+1)\pi n_{x1} v_1] \cdot \frac{\sin(\pi n_{xi} v_1)}{n \cdot \sin(\pi n_{xi} v_1)}.$$

Из этой формулы следует, что интервал между соседними минимумом и максимумом определяется примерным соотношением

$$\Delta v_{\text{мм}} = \frac{1}{2n+1}.$$

Следовательно, погрешность пеленгования «слабой» цели не должна превосходить

$$\Delta v_{\text{погр}} = \frac{1}{2(2n+1)}. \quad (14)$$

Интервал однозначного пеленгования по самой большой базе $\Delta v_{\text{одн}}(l_n) = \frac{1}{n}$. Максимальная погрешность пеленгования «слабой» цели не превосходит четверти этой величины.

На рис. 8 показаны погрешности пеленгования «сильной» и «слабой» целей $v_{\text{изм}} - v_{\text{ист}}$ в зависимости от положения последней для одиннадцатибазового пеленгатора $\mathbf{n}_x = (1, 2, \dots, 11)$. Видно, что при расположении «слабой» цели в максимумах и минимумах кривой $S_\varphi(v)$ (10) погрешности пеленгования равны нулю. Они максимальны в середине интервала между ними и при этом не превышают максимальной расчетной величины (14).

При перемещении «слабой» цели по оси v от максимума до минимума кривой $S_\varphi(v)$ (10) уменьшается отношение значений кривой в максимумах слабой и сильной целей (при $R=0,9$ вдвое). Иными словами, происходит более интенсивное подавление «слабого» сигнала более сильным. При расположе-

нии «слабого» сигнала в максимумах кривой $S_\varphi(v)$ подавление можно аппроксимировать как R^4 , что согласуется с оценкой подавления, приведенной в статье [14] для решеток с нелинейной обработкой сигналов.

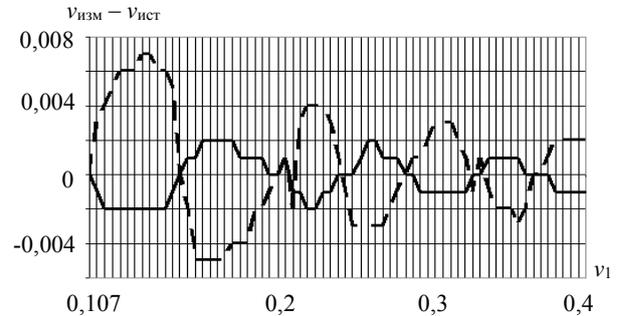


Рис. 8. Погрешности пеленгования целей: — — «сильная»; - - - - «слабая»

Заключение

Основные результаты данной работы заключаются в следующем:

1. Показано, что при наличии на входе фазового радиопеленгатора с антенной системой в виде линейной решетки двух плоских волн их угловое разрешение возможно на основе сопоставления каждой из них своей совокупности полных разностей фаз, утраченных при измерениях. Таким образом, угловое разрешение в фазовых радиопеленгаторах тесно связано с устранением неоднозначности фазовых измерений.

2. Показано, что при наличии на входе пеленгатора двух плоских волн функция правдоподобия более сильного из них может использоваться для углового разрешения. Если волны не когерентны, требуется усреднение функции правдоподобия по разности фаз принимаемых волн.

3. Проведен сравнительный анализ углового разрешения на основе функции правдоподобия и методом «суммирования косинусоид». В основе каждого из алгоритмов лежат похожие функции, поэтому относительно просто реализуемый метод «суммирования косинусоид» можно использовать для оценки характеристик разрешения методом максимального правдоподобия.

4. Оценена точность пеленгования более «слабой» цели, которая, как известно, в нелинейной системе давится более сильной. Показано, что в эквидистантных решетках максимальная ошибка пеленгования не превосходит 1/4 интервала однозначного пеленгования по самой большой фазометрической базе.

Работа выполнена в рамках проекта по госзадачу Минобрнауки РФ № FEWM-2020-0039.

Литература

1. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / А.А. Коростелев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мель-

ник и др.; под ред. В.Е. Дулевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.

2. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 1994. – 102 с.

3. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: ТУСУР, 2002. – 251 с.

4. Кинкулькин И.Е. Глобальные навигационные спутниковые системы: алгоритмы функционирования аппаратуры потребителя. – М.: Радиотехника, 2018. – 325 с.

5. Lipsky S.E. Microwave passive direction finding. – Raleigh, USA: SciTech Publishing, Inc., 2004. – 320 p.

6. Verhagen S. New Global Navigation Satellite System Ambiguity Resolution Method Compared to Existing Approaches / S. Verhagen, P.J.G. Teunissen // Journal of Guidance Control and Dynamics. – 2006. – Vol. 29, No. 4. – P. 981–991.

7. Рагынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.

8. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А.И. Куприянов, Л.Н. Шустов. – М.: Вузовская книга, 2011. – 800 с.

9. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. – М.: Военное изд-во, 2006. – 454 с.

10. Леонов А.И. Моноимпульсная радиолокация / А.И. Леонов, К.И. Фомичев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.

11. Хургин Я.И. Фinitные функции в физике и технике / Я.И. Хургин, В.П. Яковлев. – М.: Наука, 1971. – 408 с.

12. Фазовый пеленгатор. Патент РФ 2536440 МПК G 01 S 3/46. / В.Н. Смирнов (РФ), А.В. Шереметьев (РФ), С.Н. Кульпин (РФ), М.Н. Тимофеев (РФ), В.В. Иванов (РФ). – № 2 013 125 080 / 07; заявл. 29.05.13; опубл. 27.12.14, Бюл. № 36. – 12 с.

13. Денисов В.П. Вопросы разрешающей способности фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, Д.В. Ерофеев // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 11–16. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-11-16

14. Шоу Е. Теоретические и экспериментальные исследования разрешающей способности мультипликативных и аддитивных антенных решеток / Е. Шоу, Д. Девис // Зарубежная радиоэлектроника. – 1965. – № 11. – С. 103–123.

Денисов Вадим Прокопьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. радиотехнических систем (РТС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-36-70
Эл. почта: dvp15@sibmail.com

Дубинин Дмитрий Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники и систем связи ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-4588-3778
Тел.: +7 (382-2) 41-33-65
Эл. почта: dvd012@mail.ru

Ерофеев Денис Вадимович

Аспирант каф. РТС ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-427-80-94
Эл. почта: erofeev_dv@mail.ru

Denisov V.P., Dubinin D.V. Erofeev D.V.

Analysis of the resolution of panoramic phase direction finder

It is shown that the angular resolution of signals in phase direction finders with antenna systems in the form of linear arrays of weakly directed elements is achieved by determining for each of the signals of its set of total phase differences lost during measurements. The common grounds for angular resolution are shown by the maximum likelihood and the “cosine summation” methods. The accuracy estimates of direction finding of a weaker signal of the two received.

Keywords: resolving ability, phase difference, maximum likelihood method.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-7-14

References

1. Dulevich V.E., Korostylev A.A., Kluev N.F., Mel'nik Y.A. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* [Theoretical bases of radiolocation]. Moscow, Sov. radio, 1978. 608 p. (in Russ.).

2. Belov V.I. *Teoriya fazovykh izmeritel'nykh sistem* [Theory of phase measurement systems]. Tomsk. TUSUR, 1994. 102 p. (in Russ.).

3. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Fazovye radiopelengatory* [Phase direction finders]. Tomsk. TUSUR, 2002. 251 p. (in Russ.).

4. Kinkul'kin I.E. *Globalnye navigatsionnye sputnikovye sistemy: algoritmy funkcionirovaniya apparatury potrebitelya* [Global Navigation Satellite System: functioning algorithms in user's equipment]. Moscow, Radiotekhnika, 2018. 325 p. (in Russ.).

5. Lipsky S.E. *Microwave passive direction finding*. Raleigh, USA, SciTech Publishing Inc., 2004. 320 p.

6. Verhagen S., Teunissen P.J.G. New Global Navigation Satellite System Ambiguity Resolution Method Compared to Existing Approaches. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2006, vol. 29, no. 4. pp. 981–991.

7. Ratynskiy M.V. *Adaptatsiya i sverhrazreshenie v antennykh reshetkakh* [The adaptation and superresolution in antenna arrays]. Moscow. Radio i svjaz', 2003. 200 p. (in Russ.).

8. Kupriyanov A.I., Shustov L.N. *Radioelektronnaya bor'ba. Osnovy teorii* [Electronic warfare. Theoretical bases]. Moscow, Vuzovskaya kniga, 2011. 800 p. (in Russ.).

9. Smirnov Y.A. *Radiotekhnicheskaya razvedka* [Electronic intelligence]. Moscow, Voennoe izd-vo, 2006. 454 p. (in Russ.).

10. Leonov A.I., Fomichev K.I. *Monoimpul'snaya radiolokatsiya* [The monopulse radiolocation]. Moscow. Radio i svjaz', 1984. 312 p. (in Russ.).

11. Hurginyan I.I., Yakovlev V.P. *Finitnye funktsii v fizike i tehnikе* [The finite functions in physics and technique]. Moscow. Nauka, 1971. 408 p. (in Russ.).

12. Smirnov V.N., Sheremet'ev A.V., Kul'pin S.N., Timofeev M.N., Ivanov V.V. *Fazovyi pelengator* [Phase direction finder]. Patent RF, no. 2536440, 2013.

13. Denisov V.P., Dubinin D.V., Erofeev D.V. Questions of resolving ability of phase direction finder with antenna system in the form of linear array. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, no. 4, pp. 11–16 (in Russ.).

14. Shou E., Devis D. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya razreshayuschej sposobnosti mul'tiplikativnykh i additivnykh antennykh reshetok* [Theoretical and experimental researches of resolution of multiplicative and additive antenna arrays]. *Zarubegnaya radioelektronika*, 1965, no. 11, pp. 103–123.

Vadim P. Denisov

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-36-70
Эл. почта: dvp15@sibmail.com

Dmitry V. Dubinin

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor, Department
of Radioelectronics and Communication Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID 0000-0003-4588-3778
Phone: +7 (382-2) 41-33-65
Email: dvd012@mail.ru

Denis V. Erofeev

Post-graduate student,
Department of Radio Engineering Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-36-70
Email: erofeev_dv@mail.ru

УДК 621.396.677.71

А.С. Разумихин, К.А. Лайко, Ю.О. Филимонова

Пути снижения уровня боковых лепестков в щелевых антенных решетках

Рассмотрены пути снижения уровня боковых лепестков в щелевых антенных решетках. Предложен способ снижения уровня боковых лепестков при использовании двух и более резонансных волноводно-щелевых антенных решеток. Количество антенных решеток должно быть четным и одна сдвинута относительно другой в пространстве на величину шага щели таким образом, что щели противоположного наклона оказались одна над другой, за счет этого происходит компенсация паразитной поперечной составляющей вектора E . В результате уровень боковых дифракционных лепестков уменьшается более чем на двадцать децибел.

Ключевые слова: антенная решетка, резонансная волноводно-щелевая антенная решетка, диаграмма направленности.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-15-19

Волноводно-щелевые антенные решетки (ВЩАР) широко используются в антенной технике. Их исследование и создание довольно много работ [1–8]. К основным достоинствам этих антенн относят их плоскую форму, компактные размеры, которые позволяют использовать ВЩАР в летательных аппаратах без ухудшения их аэродинамических характеристик. ВЩАР имеют достаточно высокую эффективность, механическую прочность, а также могут работать с высокими уровнями мощности.

Конструктивные решения

Резонансная антенна имеет наклонные щели, прорезанные в узкой стенке прямоугольного металлического волновода. Конструкция ВЩАР представлена на рис. 1. Оси щелей образуют некоторый угол с направлением поперечных токов. Так как щели наклонены, то поперечные токи возбуждают в них электрическое поле. Щели прорезаны в волноводе с шагом половины длины волны в волноводе $\lambda_w/2$, поэтому сдвиг фаз токов, возбуждающих соседние щели, составляет 180° , для обеспечения синфазного раскрытия с горизонтальной поляризацией соседние щели обладают противоположным наклоном α , т.е. правая с положительным наклоном (против часовой стрелки) и левая (по часовой стрелке) щель с отрицательным наклоном α . Интенсивность возбуждения щели зависит от угла её наклона [4]. Вектор электрического поля, перпендикулярный щели, разложен на горизонтальную и вертикальную составляющие (рис. 1).



Рис. 1. Разложения вектора электрического поля на горизонтальную и вертикальную составляющие

Горизонтальные составляющие обеих щелей синфазны, вертикальные находятся в противофазе. Следовательно, излучение по нормали к раскрытию определяется только горизонтальными составляющими, а вертикальные противофазные составляющие компенсируются, но под углом примерно 50°

создают паразитные дифракционные лепестки большой величины. Данный угол 50° определяется величиной шага АР.

Для горизонтальной и вертикальной поляризаций эквивалентную линейную антенную решетку (А) $d = \lambda_w/2$ на рис. 2.

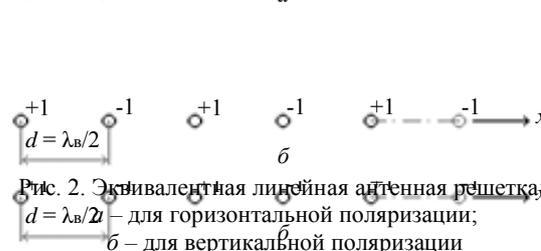


Рис. 2. Эквивалентная линейная антенная решетка; $d = \lambda_w/2$ – для горизонтальной поляризации; b – для вертикальной поляризации

Расчеты и моделирование

Проведем расчет [9] диаграммы направленности (ДН) (1, 2) ВЩАР для равномерного амплитудного распределения $A_n = 1$, выражения представлены ниже:

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d}{2} \cdot (2n-1) \sin(\theta)\right], \quad (1)$$

$$G(\theta) = \sum_{n=1}^N (-1)^n \cdot A_n \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d}{2} \cdot (2n-1) \sin(\theta)\right], \quad (2)$$

где λ – длина волны в свободном пространстве, d – расстояние между щелями (шаг АР).

Когда щели близки к углу 45° , то амплитуды для вертикальных и горизонтальных составляющих равны. Если угол отличается от 45° , то разницу в амплитудах можно учесть с помощью коэффициента a .

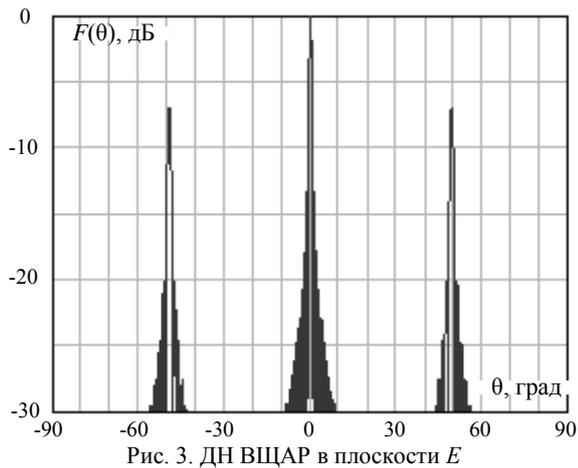
Результирующая диаграмма направленности принимает вид

$$F_{\text{resul}}(\theta) = \sqrt{[F(\theta)/N]^2 + [a \cdot G(\theta)/N]^2}, \quad (3)$$

$$F_{\text{resul}} \text{DB}(\theta) = 20 \log\{F_{\text{resul}}(\theta)\}, \quad (4)$$

где $F_{\text{resul}} \text{DB}(\theta)$ – результирующая ДН (3) в дБ.

Расчет проведен для ВЩАР с количеством щелей 100, с шагом $d = 19,75$ мм и на частоте 9,9 ГГц. Характеристика направленности в горизонтальной плоскости (4) представлена на рис. 3.

Рис. 3. ДН ВЩАР в плоскости E

Геометрические размеры ВЩАР представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические размеры ВЩАР

Параметр	Значение
Центральная частота, ГГц	9,9
Сечение волновода $a \times b$, мм	23×10
Длина волновода, м	2
Количество пар щелей	50
Угол наклона щели, градус	20...45
Шаг наклона, градус	0,5

Также проведено моделирование данной структуры ВЩАР в CST Microwave Studio [10]. Модель представлена на рис. 4.

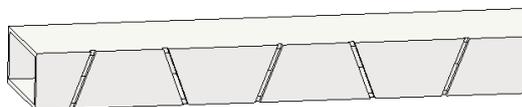
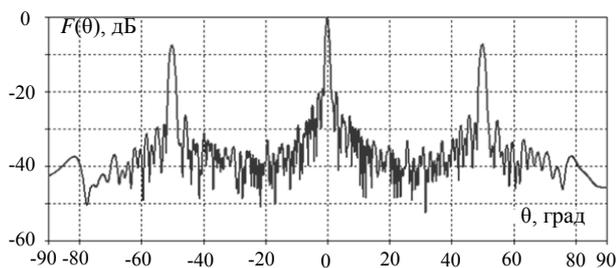


Рис. 4. Модель ВЩАР

Диаграмма направленности в плоскости E на исследуемой частоте представлена на рис. 5.

Рис. 5. ДН ВЩАР в плоскости E

Анализируя результаты моделирования антенны, можно заметить, что направление излучения луча антенны составляет 0° относительно нормали к узкой стенке волновода со щелями, ширина главного луча по уровню половинной мощности составляет 1° . Уровень боковых лепестков не более -7 дБ.

Результаты моделирования с высокой точностью совпадают с результатами расчетов. Как видно из результатов, уровень паразитных дифракционных

лепестков в обоих случаях составляет -7 дБ. И они расположены под углом 50° .

Для устранения паразитных боковых лепестков используют ряд способов. В литературе [7, 8] предлагается подавлять поляризованную поперечно волноводу составляющую поля наклонной щели с помощью таких средств, как дроссельная ловушка или разделительный металлический блок (рис. 6), помещенный между щелями.

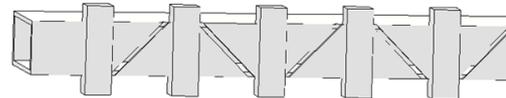


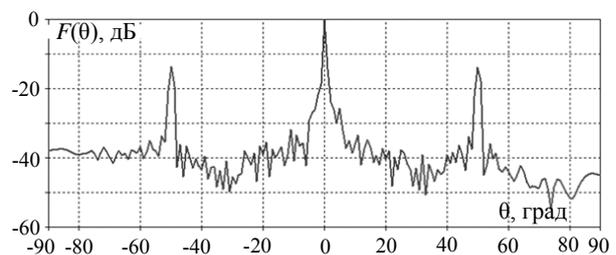
Рис. 6. Система наклонных щелей в узкой стенке волновода с металлическими разделительными блоками для подавления вертикальной поляризованной составляющей излучения

Недостаток данных подходов требует существенного усложнения конструкции ВЩАР.

Промоделируем вариант с разделительными металлическими блоками, которые расположены от края одной щели до края другой, с применением CST Microwave Studio [10].

Модель ВЩАР, построенная в CST Microwave Studio в соответствии с размерами (см. табл. 1), представлена на рис. 6.

ДН в плоскости E на частоте 9,9 ГГц изображена на рис. 7.

Рис. 7. ДН ВЩАР с металлическими разделительными блоками, в плоскости E

Анализируя результаты моделирования антенны, можно отметить, что направление излучения луча антенны составляет 0° относительно нормали к узкой стенке волновода со щелями, ширина главного луча по уровню половинной мощности составляет 1° . Уровень боковых лепестков уменьшился с -7 до $-13,5$ дБ. Однако зачастую этого недостаточно на практике.

Двумерная АР

Как правило, в радиотехнических комплексах используют двумерные АР, состоящие из нескольких линейных ВЩАР. В данном случае рассматриваемую проблему снижения уровня дифракционных боковых лепестков можно решить с использованием нескольких ВЩАР, запитанных синфазно, минимальное количество которых две, сдвинутых в горизонтальной плоскости с шагом расположения щелей, таким образом, чтобы соседние щели из смежных этажей двойной решетки обладали противоположным наклоном. Тогда правая щель верхней решетки оказывается над левой щелью нижней решетки (рис. 8).

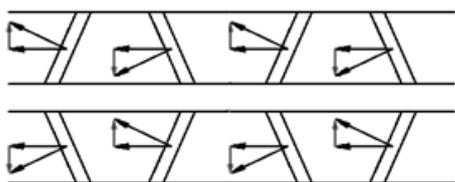


Рис. 8. Две ВЦАР, сдвинутые с шагом расположения щелей

Для расчета ДН в горизонтальной плоскости ВЦАР найдём результирующее амплитудное распределение как для горизонтальной составляющей вектора E , так и для вертикальной. Используем метод эквивалентного линейного излучателя, для чего проецируем все щели на ось x (рис. 9). Эквивалентное амплитудное распределение находим по двум поляризациям горизонтальной и паразитной вертикальной. Метод эквивалентного излучателя детально рассмотрен в литературе [1, 6, 8, 11–14]. Схема эквивалентной линейной АР представлена на рис. 9.

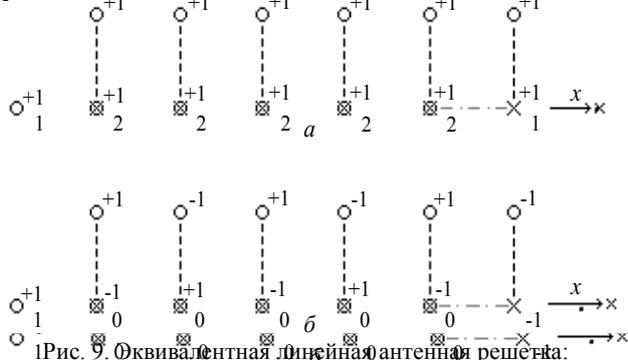


Рис. 9. Эквивалентная линейная антенная решетка:
 а – для горизонтальной поляризации;
 б – для вертикальной поляризации

Под ось x показаны эквивалентные амплитудные распределения для горизонтальной (см. рис. 9, а) и вертикальной поляризаций (см. рис. 9, б). Как видно из рис. 9, б, результирующее эквивалентное амплитудное распределение для вертикальной поляризации скомпенсировано (имеет результирующие нули) за исключением краевых эффектов двух крайних излучателей. Следовательно, паразитные дифракционные лепестки в данной схеме будут отсутствовать [13, 14].

Проведем расчет [9] по предложенной выше методике ДН двух линейных ВЦАР, смещённых с шагом d . Результаты расчета представлены на рис. 10.

Как видно, уровень дифракционных паразитных лепестков составляет менее минус 35 дБ.

Предложенная конструкция ВЦАР промоделирована с помощью CST Microwave Studio [10] (рис. 11, 12) в соответствии с рассчитанной геометрией (см. табл. 1).

Диаграмма направленности в плоскости E на частоте 9,9 ГГц представлена на рис. 12.

Анализируя результаты моделирования антенны, можно заметить, что направление излучения луча антенны составляет 0° относительно нормали к узкой стенке волновода со щелями, ширина главного луча по уровню половинной мощности составляет 1° .

Уровень боковых лепестков уменьшился с -7 до -30 дБ, что соответствует рассчитанным результатам.

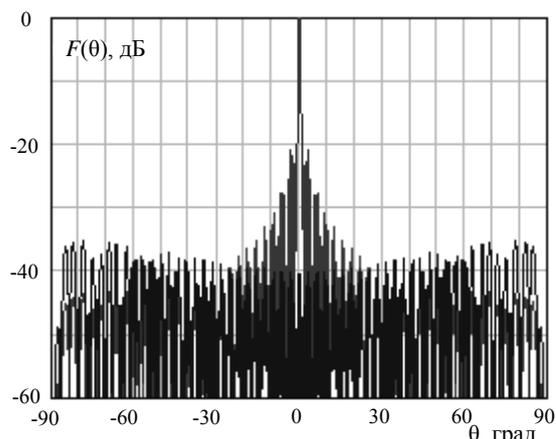


Рис. 10. Результирующая ДН в плоскости E

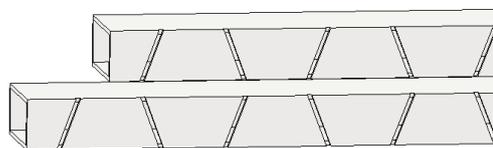


Рис. 11. Модель двойной ВЦАР

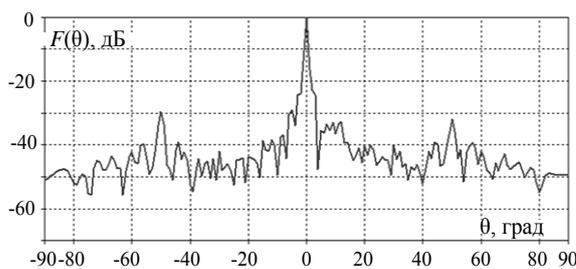


Рис. 12. ДН ВЦАР главного и паразитного лепестков в плоскости E

Результаты сравнений ВЦАР разных структур приведены в табл. 2.

Таблица 2
 Сравнительные результаты ВЦАР

Вид ВЦАР	ВЦАР	ВЦАР с металл. раздел. блоками	Две ВЦАР
Уровень боковых лепестков, дБ	-7	-13,5	-30

Проанализировав полученные результаты различных структур ВЦАР, можно сделать следующий вывод:

– уровень боковых лепестков предложенным способом составляет менее -30 дБ.

Таким образом, данное конструктивное решение структуры ВЦАР позволяет существенно снизить уровень боковых лепестков и добиться наиболее лучших технических характеристик.

Заключение

Рассмотрен способ снижения паразитных дифракционных лепестков за счет конструктивного построения ВЦАР с применением двух и более линейек, расположенных одна над другой со смещением

на величину шага щелей так, чтобы правая щель располагалась над левой. При этом результирующий уровень боковых лепестков значительно снижается по сравнению с другими известными способами.

Литература

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1998. – 427 с.
2. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. – Ч. 2. – М.: Связь, 1977. – 288 с.
3. Пистолькорс А.А. Антенны. – М.: Государственное изд-во по вопросам связи и радио, 1947. – 480 с.
4. Milligan T.A. *Modern Antenna design*. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. – 630 p.
5. Design and operation of an edge-wall slotted waveguide array antenna with ultralow side lobes for application of off-shore radar / Ke-Ru Chou, Han-Nien Lin, Wei-Hsien Lu, Heng-Wen Chang, Kwong-Kau Tiong // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2015. – Vol. 23, No. 5. – P. 620–627.
6. Катрич В.А. Волноводно-щелевая решетка с наклонными щелями в узкой стенке прямоугольного волновода / В.А. Катрич, С.А. Мартыненко, С.В. Пшеничная // *Изв. высш. учеб. завед. России. Радиоэлектроника*. – 2002. – № 11-12. – С. 14–22.
7. Кюн Р. Микроволновые антенны. – Л.: Судостроение, 1967. – 518 с.
8. Марков Г.Т. Антенны / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
9. PTC Mathcad [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathcad.com/ru/>, свободный (дата обращения: 28.11.2019).
10. CST Studio Suite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/productsservices/simulia/products/cst-studio-suite/>, свободный (дата обращения: 03.12.2019).
11. Balanis C.A. *Modern antenna handbook*. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. – 1704 p.
12. Levin B. *Antenna Engineering Theory and Problems*. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 406 p.
13. Нечаев Е.Е. Излучающие раскрыты и решетки: учеб. пособие. – М.: МГТУ, 1998. – 80 с.
14. Single ridge waveguide slot incremental conductance analysis and array antenna design / Rui Xu, Jiangying Li, Dingyi Luo, Guangwei Yang // *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, IEEE Xplore*. – 2014. – P. 143–146.
15. Teng Li. Design of an Edge Slotted Waveguide Antenna Array Based on T-Shaped Cross-Section Waveguide // *International Journal of Antennas and Propagation*. – 2017. – P. 1–8.

Разумихин Анатолий Сергеевич

Аспирант каф. конструирования и технологии электронных средств (КТПС) Новосибирского государственного технического ун-та (НГТУ) Карла Маркса пр-т., д. 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-953-77-88-237
Эл. почта: at-te1@mail.ru

Лайко Константин Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КТПС НГТУ Карла Маркса пр-т., д. 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-913-914-45-99
Эл. почта: play-byte@mail.ru

Филимонова Юлия Олеговна

Канд. техн. наук, доцент каф. КТПС НГТУ Карла Маркса пр-т., д. 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-913-708-68-39
Эл. почта: jul7788@mail.ru

Razumikhin A.S., Layko K.A., Philimonova J.O.

Ways to reduce the level of side lobes in slot antenna arrays

The ways to reduce the level of side lobes in slot antenna arrays are considered. A method is proposed to reduce the level of side lobes using two or more resonant waveguide-slot antenna arrays. The number of antenna arrays must be even and one should be shifted relatively to the other in space by the size of the gap step, so that the gap of the opposite slope is one above the other, due to this, the parasitic transverse component of the vector E is compensated. As a result, the level of the side diffraction lobes decreases by several orders of magnitude.

Keywords: antenna array, resonant waveguide-slot antenna array, radiation pattern.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-15-19

References

1. Sazonov D.M. *Antenny i ustroistva SVC* [Antennas and Devices UHF]. Moscow, Graduate School Publ., 1998, 427 p. (in Russ.).
2. Aizenberg G.Z. *Anteny UKV chast 2* [VHF Antennas vol 2]. M., Svyaz Publ., 1977, 288 p. (in Russ.).
3. Pistol Kors A.A. *Antenny* [Antennas]. M., State Publishing House for Communications and Radio Communications Publ., 1947, 480 p. (in Russ.).
4. Milligan T.A., *Modern Antenna Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 630 p.
5. Ke-Ru Chou, Han-Nien Lin, Wei-Hsien Lu, Heng-Wen Chang, Kwong-Kau Tiong. Design and operation of an edge-wall slotted waveguide array antenna with ultralow side lobes for application of off-shore radar, *Journal of Marine Science and Technology*, 2015, vol. 23, no. 5, pp. 620–627.
6. Katrich V.A., Martynenko C.A., Pchenichnaia C.V. *Volnovodno-chelevoiia rechetka s naklonnyimi cheliami v uzkoj stenke priamougolnogo volnovoda* [Waveguide-slotted grating with inclined slots in the narrow wall of a rectangular waveguide]. News of higher educational institutions of Russia. *Radio electronics*, 2002. no. 11-12, pp. 14–22.
7. Kyun R. *Mikrovolnovyye anteny* [Microwave antennas]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1967, 518 p. (in Russ.).
8. Markov G.T., Sazonov D.M. *Antenny* [Antennas]. Moscow, Energiya, 1975, 528 p.
9. PTC Mathcad. Available at: <https://www.mathcad.com/ru/> (Accessed: November 28, 2019).
10. CST Studio Suite. Available at: <https://www.3ds.com/productsservices/simulia/products/cst-studio-suite/> (Accessed: December 3, 2019).
11. Balanis C.A. *Modern antenna handbook*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2008. 1704 p.
12. Levin B. *Antenna Engineering Theory and Problems*. Boca Raton, CRC Press, 2017. 406 p.
13. Nechaev E.E. *Izluchayushchiye raskryvy i reshetki: uchebnoye posobiye* [Nechaev E.E. Emitting apertures and gratings: a training manual]. Moscow, MSTU, 1998, 80 p. (in Russ.).
14. Rui Xu, Jiangying Li, Dingyi Luo, Guangwei Yang. Single ridge waveguide slot incremental conductance analysis and array antenna design *Proceedings of 3rd Asia-Pacific*

Conference on Antennas and Propagation, 2014, IEEE Xplore, China, Harbin, 2014, pp. 143–146.

15. Teng Li. Design of an Edge Slotted Waveguide Antenna Array Based on T-Shaped Cross-Section Waveguide. *International Journal of Antennas and Propagation*, China, Nanjing, 2017, pp. 1–8.

Konstantin A. Layko

Candidate of Engineering Sciences, Department of Design and Technology of Electronic, NSTU
20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7-913-914-45-99
Email: play-byte@mail.ru

Anatoliy S. Razumikhin

Post-graduate student, Department of Design and Technology of Electronic, Novosibirsk State Technical University (NSTU)
20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7-953-77-88-237
Email: at-te1@mail.ru

Yuliya O. Filimonova

Candidate of Engineering Sciences, Department of Design and Technology of Electronic, NSTU
20, Karl Marx pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7-913-708-68-39
Email: jul7788@mail.ru

УДК 004.67:519.684

В.А. Фаерман, В.С. Аврамчук

Алгоритмическое обеспечение корреляционного течеискателя, функционирующего в режиме реального времени

Рассматривается адаптация алгоритма корреляционной обработки сигналов для решения задачи определения положения трубопроводных утечек акустическим способом в режиме реального времени. Новизна предложенного решения состоит в возможности уточнения значений результирующей корреляционной функции на основе обработки непрерывно поступающих порций данных. Для обеспечения более низких требований к вычислительным ресурсам по сравнению с классическим алгоритмом используются рекурсивные схемы вычисления корреляционных функций и нормирующих множителей. Это позволяет сохранить характерные для корреляционных течеискателей функциональные возможности и при этом не хранить в памяти промежуточные данные. Таким образом, предложенное алгоритмическое решение может быть использовано на компактных вычислительных платформах, таких как одноплатные компьютеры. Работоспособность коррелятора, программно реализованного в среде MATLAB, показана в ходе модельного эксперимента в режиме реального времени. С использованием синтезированных сигналов, моделирующих шум утечки, исследовано влияние параметров коррелятора на информативность корреляционного анализа при оценке времени запаздывания. Так, в частности, показано, что применение окон низкого разрешения в сочетании с высоким коэффициентом перекрытия позитивно сказывается на информативности анализа и ослабляет требования, предъявляемые к продолжительности сигналов.

Ключевые слова: корреляционный течеискатель, коррелятор, корреляционный анализ, оценка времени запаздывания, MATLAB.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-20-26

Практически важной задачей цифровой обработки сигналов является оценка времени запаздывания, которая находит применение в ряде приложений радиотехники [1], гидролокации [2], речевого управления [3] и неразрушающего контроля [4].

Широко известным и эффективным методом решения этой задачи является корреляционная обработка сигналов, которая предполагает получение взаимной корреляционной функции (ВКФ) сигналов и последующее определение положения корреляционного пика [5]. Примером практического применения корреляционной обработки является задача определения положения трубопроводных утечек.

Суть подхода подробно описана в [4]. Два датчика размещаются на противоположных сторонах линейного участка трубопровода, на котором предполагается наличие утечки. Порождаемый истекающей через отверстие жидкостью сигнал принимается обоими датчиками, однако с различным временным смещением. Оценка времени запаздывания между сигналами, принимаемыми датчиками, может быть использована для определения положения утечки. Совершенствование алгоритмов обработки сигналов применительно к решению этой практической задачи является актуальным и привлекает внимание как российских [6], так и зарубежных исследователей [7].

Специализированные устройства, предназначенные для определения положения утечек описанным методом, называются корреляционными течеискателями. Специфика эксплуатации определяет требования к массогабаритным характеристикам течеискателей и их энергопотреблению [8]. Обеспечение этих требований делает актуальной задачу реализации основных алгоритмов обработки сигналов на компактных вычислительных платформах, таких как одноплатные компьютеры.

Также в [8] отмечается важность для течеискателя обеспечивать возможность обработки сигналов в режиме реального времени под управлением оператора. Для реализации последнего на портативных вычислительных устройствах, существенно уступающих персональным компьютерам в объеме памяти и вычислительным возможностям процессора, необходима адаптация алгоритмов корреляционной обработки сигналов. Данная работа направлена на модификацию известных алгоритмов с целью исключить избыточные вычисления и хранение промежуточных данных, обеспечив при этом сохранение привычных функциональных возможностей корреляционных течеискателей.

Простой коррелятор

Функциональная схема устройства, осуществляющего базовую корреляционную обработку, представлена на рис. 1 [5].

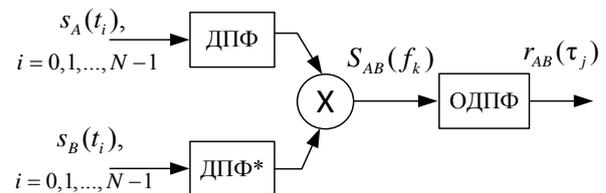


Рис. 1. Простой коррелятор

Обработка цифровых сигналов $s_A(t_i)$, $s_B(t_i)$ ($t_i = i \cdot \Delta t$, $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$) в соответствии со схемой на рис. 1 производится согласно отношению

$$r_{AB}(\tau_j) = \frac{1}{N} \cdot F^{-1}[S_{AB}(f_k)], \quad (1)$$

$$S_{AB}(f_k) = S_A^*(f_k) \times S_B(f_k), \quad (2)$$

$$S_A^*(f_k) = F^*[s_A(t_i) \times W(i)], \quad S_B(f_k) = F[s_B(t_i) \times W(i)]. \quad (3)$$

Выше использованы следующие обозначения: N – число отсчётов сигналов в одном сегменте данных; Δt – шаг дискретизации; $W(i)$ – отсчёты оконной функции; \times – поэлементное умножение массивов; $F[\cdot]$ – прямое оконное дискретное преобразование Фурье (ДПФ); $F^*[\cdot]$ – комплексное сопряжение результата ДПФ (ДПФ*); $F^{-1}[\cdot]$ – обратное ДПФ (ОДПФ); $S_A(f_k)$, $S_B(f_k)$ – дискретные спектры сигналов; $S_{AB}(f_k)$ – взаимный спектр сигналов; $r_{AB}(\tau_j)$ – ВКФ.

Последующие действия сводятся к определению положения пика на графике ВКФ и оценке времени запаздывания (T_d) согласно

$$T_d = \arg \max(r_{AB}(\tau_j)).$$

В силу того, что в качестве АЦП в течеискателях нередко применяются звуковые карты компьютеров, типовое значение частоты дискретизации составляет $f_d = 1/\Delta t = 44100$ Гц. В то же время N выбирается с учётом диапазона потенциально возможных значений T_d и составляет обычно от 2048 до 16384 отсчётов.

Коррелятор с сегментацией данных

Получение корреляционной функции с применением (1), с одной стороны, накладывает ограничение на размерность входных данных (N) и, с другой стороны, требует выполнения нелинейно нарастающего количества вычислительных операций. Для того чтобы обеспечить возможность обработки сигналов, представленных большим числом отсчётов, применяется сегментация данных [9].

Сегментация предполагает разбиение исходных сигналов, содержащих $Q \cdot N$ отсчётов, на Q сегментов по N отсчётов каждый. После чего каждый q -й ($q = 0, 1, \dots, Q - 1$) сегмент данных обрабатывается в соответствии с (1) с целью получения ВКФ $r^{(q)}_{AB}(\tau_j)$, а окончательный результат формируется путём суммирования каждой из Q функций

$$r_{AB}(\tau_j) = F^{-1} \left[\sum_{q=0}^{Q-1} w_q \cdot S_{AB}^{(q)}(f_k) \right], \quad (4)$$

где w_q – весовой коэффициент, $S_{AB}^{(q)}(f_k)$ – взаимный спектр сигналов, вычисленный в соответствии с (2) для q -го сегмента.

Функциональная схема коррелятора с сегментацией представлена на рис. 2. Необходимо отметить, что в силу линейности ДПФ [4] усреднение ВКФ и взаимных спектров сигналов эквивалентно.

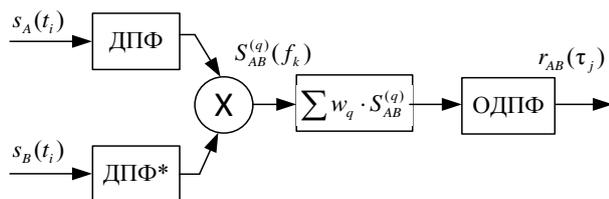


Рис. 2. Коррелятор с сегментацией данных

Как правило, при выборе весовых коэффициентов в (4) руководствуются принципом когерентного усреднения ВКФ [10]

$$w_q = \frac{1}{Q}, \quad q = 0, 1, \dots, Q - 1.$$

Однако применение (4) предполагает наличие априорных сведений о продолжительности входных сигналов. В качестве альтернативы предложено применение рекурсивного выражения

$$r_{AB}(\tau_j, q) = \frac{1}{q} \cdot F^{-1} \left[(q-1) \cdot S_{AB}(f_k, q-1) + S_{AB}^{(q)}(f_k) \right], \quad (5)$$

где $S_{AB}(f_k, q)$ – результирующий взаимный спектр после обработки q -го сегмента данных. Преимуществом (5) является возможность обработки непрерывно поступающих на вход коррелятора данных.

Поскольку обработка данных осуществляется по сегментам, отсчёты сигналов, поступающие с интервалом Δt , накапливаются в запоминающем устройстве на входе коррелятора, которое далее именуется буфером.

Наложение и чувствительность

В ряде задач спектрального анализа и корреляционной обработки сигналов применяется сегментация с наложением [9]. Взаимное наложение сегментов способствует увеличению числа сегментов и применяется в условиях недостаточности располагаемых данных. Это актуально и в задачах корреляционного течеискания, поскольку, в силу непостоянства давления жидкости, производимый утечкой шум не является стационарным сигналом. Наложение позволяет ослабить требования к продолжительности временных интервалов, в течение которых сигнал может рассматриваться как стационарный.

Суть метода наложения состоит в том, что любая пара соседних сегментов имеет некоторое количество общих отсчётов N_0 , фактическое число которых определяется коэффициентом перекрытия k_{ol}

$$N_0 = \lceil k_{ol} \cdot N \rceil, \quad 0 \leq k_{ol} \leq 1.$$

Введение перекрытия не оказывает влияния на процедуру обработки отдельного сегмента, однако влияет непосредственно на величину B_0 буфера на входе коррелятора

$$B_0 = \lfloor (1 - k_{ol}) \cdot N \rfloor.$$

Таким образом, объём буфера определяется коэффициентом перекрытия и величиной сегмента данных.

Наряду с коэффициентом перекрытия k_{ol} может быть введён коэффициент чувствительности k_s , определяющий, насколько результирующая ВКФ изменчива под влиянием обрабатываемых сегментов данных. Введение коэффициента необходимо для создания канала управления коррелятором непосредственно в ходе приёма и обработки сигналов. В простейшем случае управление может осуществляться в ручном режиме оператором течеискателя [11].

Для определённости, положим область допустимых значений коэффициента чувствительности $-1 \leq k_s \leq 1$. При $k_s = 1$ результирующее значение ВКФ полностью определяется последним обработанным сегментом данных. Напротив, при $k_s = -1$ результирующая ВКФ не изменяется под влиянием

поступающих данных. При $k_s = 0$ вычисления сводятся к (5). Руководствуясь принятыми положениями, преобразуем (5) для обоих случаев:

$$r_{AB}(\tau_j, q) = (1 - k_s) \times \left(\frac{1}{q} \cdot F^{-1} \left[(q-1) \cdot S_{AB}(f_k, q-1) + S_{AB}^{(q)}(\tau_j) \right] \right) + k_s \cdot S_{AB}^{(q)}(\tau_j), \quad k_s \in [0, 1]; \quad (6)$$

$$r_{AB}(\tau_j, q) = \frac{1}{q} \times F^{-1} \left[(q-1-k_s) \cdot S_{AB}(f_k, q-1) + (1+k_s) \cdot S_{AB}^{(q)}(\tau_j) \right], \quad k_s \in [-1, 0). \quad (7)$$

Нормирование корреляционной функции

Значения ВКФ определяются не только степенью коррелированности сигналов, но и их уровнем. Для того чтобы исключить последнее, используется нормирование.

Нормирующий множитель $1/D_q$ для ВКФ, полученной по единственному q -му сегменту данных, вычисляется в соответствии с формулой Пирсона [4]

$$\frac{1}{D_q} = \frac{1}{\sigma \left[s_A^{(q)}(t_i) \right] \cdot \sigma \left[s_B^{(q)}(t_i) \right]}, \quad (8)$$

где $\sigma[\cdot]$ – среднеквадратическое отклонение. В силу свойств коэффициента, вычисляемого по (8), справедливо отношение

$$-1 \leq \frac{1}{D_q} \cdot r_{AB}^{(q)}(\tau_j) \leq 1. \quad (9)$$

Аналогично может быть получен коэффициент $1/D(q)$ для ВКФ, вычисляемой в соответствии с (5), такой что

$$-1 \leq \frac{1}{D(q)} \cdot r_{AB}(\tau_j, q) \leq 1.$$

Для этого представим ВКФ на произвольном Q -м шаге $r_{AB}(\tau_j, Q)$ следующим образом

$$r_{AB}(\tau_j, Q) = \frac{1}{Q} \cdot \sum_{q=1}^Q F^{-1} \left[S_{AB}^{(q)}(\tau_j) \right]. \quad (10)$$

Учитывая (9) и (1), имеем

$$-1 \leq \frac{F^{-1} \left[S_{AB}^{(q)}(\tau_j) \right]}{D_q} \leq 1. \quad (11)$$

Однако если справедливо (11), то справедливо и

$$-1 \leq \frac{\sum_{q=1}^Q F^{-1} \left[S_{AB}^{(q)}(\tau_j) \right]}{\sum_{q=1}^Q D_q} \leq 1. \quad (12)$$

При этом числитель (12) с точностью до постоянного множителя соответствует правой части (10), следовательно,

$$\frac{1}{D(Q)} = Q \cdot \frac{1}{\sum_{q=1}^Q D_q}. \quad (13)$$

В качестве альтернативы (13) для применения совместно с (5) предложено рекурсивное выражение

$$D(q) = \frac{1}{q} \cdot \left[(q-1) \cdot D(q-1) + D_q \right].$$

Аналогичным образом могут быть получены выражения для коэффициентов, применяемых совместно с (6) и (7) соответственно:

$$D(q) = \frac{1-k_s}{q} \cdot \left[(q-1) \cdot D(q-1) + D_q \right] + k_s \cdot D_q,$$

$$D(q) = \frac{1}{q} \cdot \left[(q-1-k_s) \cdot D(q-1) + (1+k_s) \cdot D_q \right].$$

Проверка алгоритмов

Предложенные алгоритмы были реализованы в среде MATLAB для проверки их работоспособности. Для синтеза тестовых сигналов использовалась программная модель, также реализованная в MATLAB и описанная далее.

Модель сигнала утечки основана на эмпирической модели акустической эмиссии, производимой истекающей через отверстие жидкостью под давлением [12]. Очевидно, что виброакустический сигнал, принимаемый удалёнными датчиками, отличается от сигнала, регистрируемого непосредственно в месте утечки. Для того чтобы оценить искажения, которые претерпевает сигнал, использована модель «труба как фильтр» [13]. Динамическая характеристика фильтра определяется нижеприведёнными соотношениями

$$H_{A,B}(f, d_{A,B}) = e^{-2\pi f \cdot \beta \cdot d_{A,B}} \cdot e^{-i \cdot 2\pi f \cdot \frac{d_{A,B}}{V}},$$

$$V = \frac{V_0}{\sqrt{1 + \frac{B \cdot (D+2 \cdot h)}{E \cdot h}}},$$

$$\beta = \left(\frac{B \cdot (D+2 \cdot h)}{10 \cdot E \cdot h} \right) / \left(V \cdot \sqrt{1 + \frac{B \cdot (D+2 \cdot h)}{E \cdot h}} \right),$$

где $d_{A,B}$ – расстояния от утечки до датчиков; B – модуль упругости жидкости; V_0 – свободная скорость звука в жидкости; D – внутренний диаметр трубы; h – толщина стенки трубы; E – модуль Юнга материала, из которого изготовлена труба; V – скорость распространения звука вдоль трубопровода; β – коэффициент ослабления. Более подробное описание модели, алгоритмов синтеза сигналов и их программной реализации дано в [14].

При синтезе сигналов моделировалась следующая ситуация. На линейном участке стального водопровода с внутренним диаметром 80 мм и толщиной стенки 4 мм присутствует отверстие диаметром 2,5 мм. Давление в водопроводе считается равным 3 атм. Датчики расположены в противоположных

концах линейного участка трубопровода на расстоянии 7 и 13 м от места утечки. Спектральные характеристики аддитивного некоррелированного шума генерировались в соответствии с рекомендациями в [12].

На рис. 3 представлены амплитудные спектры чистых и смешанных со случайными некоррелированными шумами сигналов.

Информативность корреляционного анализа в задачах оценки времени запаздывания определяется отношением сигнал/шум на выходе коррелятора. В качестве оценки отношения сигнал/шум в [15] предложена следующая безразмерная величина:

$$I = \frac{\max[r_{AB}(\tau_j)]}{\text{СКЗ}[r_{AB}(\tau_j)]}, \quad (14)$$

где СКЗ – среднеквадратическое значение функции. Таким образом, (14) количественно характеризует визуальную различимость пика на коррелограмме, как это представлено на рис. 4. Дополнив (14) зависимостью от объёма анализируемых данных (продолжительности записи сигналов на входе коррелятора), получим

$$I(t) = \frac{\max[r_{AB}(\tau_j, q(t))]}{\text{СКЗ}[r_{AB}(\tau_j, q(t))]}, \quad q(t) = \left\lfloor \frac{t}{N \cdot \Delta t} \right\rfloor.$$

На рис. 5 для чистого сигнала представлен вид зависимости $I(t)$ для различных значений чувствительности k_s (при $k_{ol} = 0$). При $k_s < 0$ функция $I(t)$ возрастает медленнее, чем при $k_s = 0$.

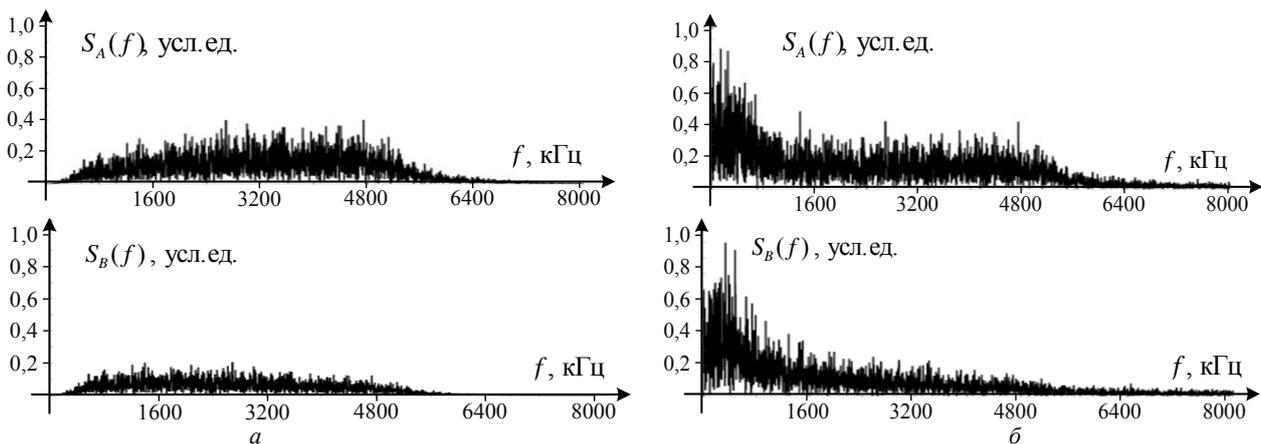


Рис. 3. Амплитудные спектры тестовых сигналов: а – исходный сигнал (два канала); б – исходный сигнал с добавлением шума (два канала). Амплитуды приведены в усл. ед.

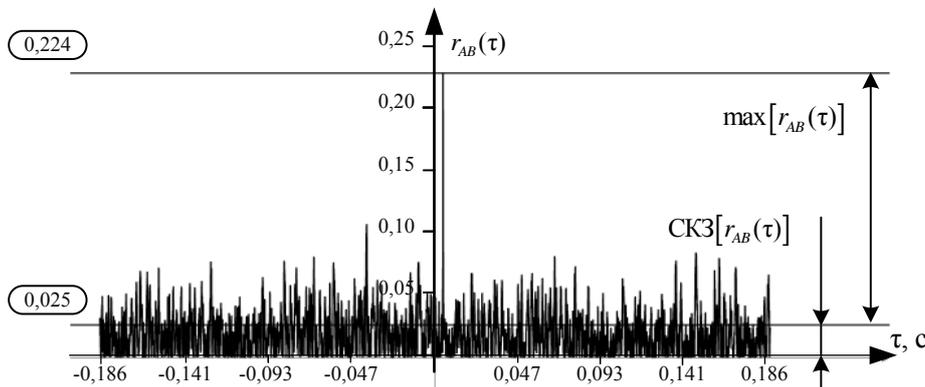


Рис. 4. Модуль ВКФ зашумлённого сигнала

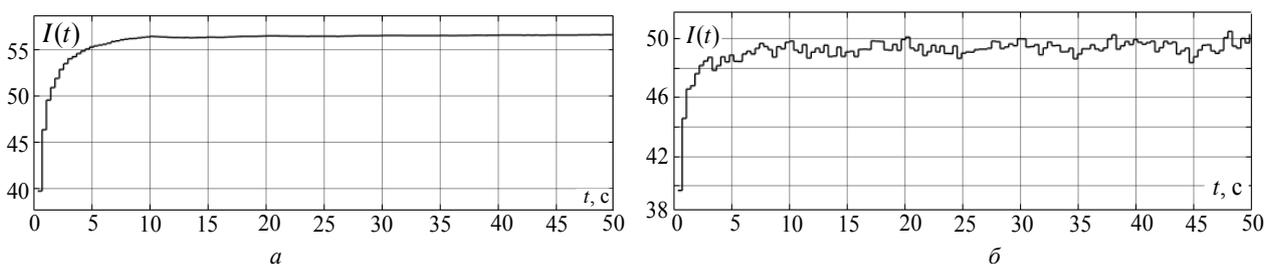


Рис. 5. Графики зависимости $I(t)$ для различных значений коэффициента чувствительности k_s : а – 0; б – 0,5

Исключая это обстоятельство, существенного влияния на вид зависимости варьирование коэффициента в диапазоне отрицательных значений не оказывает. При $k_s > 0$ функция $I(t)$ не имеет установившегося значения (см. рис. 5, б), поскольку сигнал на выходе коррелятора находится в непосредственной зависимости от его входов в соответствии с (7). В целом результаты свидетельствуют о корректности работы алгоритма.

Исследование влияния параметров

В соответствии с принципом, описанным в предыдущем разделе, было проведено исследование влияния коэффициента перекрытия k_{ol} и типа оконной функции $W(i)$ на вид зависимости $I(t)$ при анализе зашумленных сигналов. Использовались следующие оконные функции [16]: высокого разрешения (ВР) – прямоугольное окно, среднего разрешения (СР) – окно Блэкмана–Натэлла, низкого разрешения (НР) – окно с плоской вершиной. В качестве параметров, характеризующих вид зависимости, были использованы следующие: результирующее значение (I_{\max}); время установления значения ($T_{\text{изм}}$).

Результаты эксперимента сведены в таблицу.

Влияние параметров расчета на вид зависимости $I(t)$

Параметры		Характеристики кривой	
k_{ol}	$W(i)$	I_{\max}	$T_{\text{изм}}$
0	ВР	8,633	39,81
20		9,431	36,22
50		9,843	31,67
75		9,806	31,88
90		9,806	31,84
0	СР	8,413	49,45
20		10,179	49,53
50		13,096	46,82
75		13,583	36,79
90		13,515	33,17
0	НР	9,469	49,50
20		11,950	49,61
50		15,329	46,89
75		17,011	43,14
90		17,067	36,85

Результирующее значение I_{\max} определялось как

$$I_{\max} = I(T_{\max}),$$

где T_{\max} – полное время эксперимента. Время установления значения $T_{\text{изм}}$ определялось как минимальное значение, удовлетворяющее следующему неравенству:

$$0,95 \cdot I_{\max} \leq I(t) \leq 1,05 \cdot I_{\max} (\forall t > T_{\text{изм}}).$$

Полученные зависимости в целом соответствуют графику, представленному на рис. 5. Различия между кривыми исчерпываются результирующими значениями и временем их установления.

По результатам исследований, представленным в таблице, можно утверждать, что наибольшую информативность анализа обеспечивают высокое перекрытие в сочетании с оконной функцией низкого разрешения. При этом необходимо отметить следующие обстоятельства: 1) в ходе увеличения k_{ol} в определённый момент наступает насыщение, и

дальнейшее его изменение в большую сторону не улучшает результата (I_{\max}); 2) увеличение k_{ol} приводит к уменьшению $T_{\text{изм}}$, что свидетельствует о том, что для получения значения I , близкого к I_{\max} при использовании перекрытия, требуется меньший объём выборки.

Заключение

В статье предложены алгоритмы корреляционного анализа, ориентированные на выполнение в реальном масштабе времени, и приведено их математическое обоснование. Предложенные алгоритмы реализуют функции обработки сигналов, характерные для корреляционных теческателей, и при этом не используют дополнительную памяти для хранения промежуточных результатов. Работоспособность алгоритмов показана на программном прототипе коррелятора, реализованного в MATLAB.

Введение в алгоритм обработки сигналов параметров перекрытия при сегментации данных, а также чувствительности коррелятора обеспечивает дополнительные возможности влияния на производимые вычисления. Так, в ходе модельного эксперимента показано, что увеличение коэффициента перекрытия способствует уменьшению времени, в течение которого отношение сигнал/шум на выходе коррелятора приходит к максимальному значению. Это ослабляет требования к продолжительности временных интервалов, в течение которых исследуемый сигнал может правомерно рассматриваться как стационарный, что актуально в задачах поиска утечек.

Отдельно необходимо отметить, что изменение коэффициента чувствительности непосредственно во время расчётов позволяет организовать канал управления коррелятором. Этот канал управления может быть использован для организации обратной связи, но такое решение потребует введения формальной метрики для оценки сигнала на выходе коррелятора. В качестве такой метрики может быть использован параметр (14).

Литература

1. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
2. Carter C. Time delay estimation for passive sonar signal processing // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 1981. – Vol. ASSP-29, No. 3. – P. 463–470.
3. Jian M. Performance study of time-delay estimation in a room environment / M. Jian, A.C. Kot, M.H. Er // Proceeding of IEEE International conference on Circuits and Systems. – Monterey: IEEE, 1998. – P. 554–558.
4. Fuchs H.V. Ten Years of Experience with Leak Detection by Acoustic Signal Analysis / H.V. Fuchs, R. Riehle // Applied Acoustics. – 1991. – Vol. 33, Iss. 1. – P. 1–19.
5. Айфичер Э.С. Цифровая обработка сигналов: практический подход. – 2-е изд., пер. с англ. / Э.С. Айфичер, Б.У. Джервис. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 992 с.
6. Фирсов А.А. Алгоритм повышения точности локации при корреляционном теческании, основанный на анализе функции взаимного спектра / А.А. Фирсов, Д.А. Терентьев // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 8. – С. 23–27.
7. Adaptive phase transform method for pipeline leakage detection [Электронный ресурс] / Y. Ma, Y. Gao, X. Cui,

M. Brennan, F. Almeida, J. Yang // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, Iss. 2. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/2/310>.

8. Кошкин С.Ю. Выбор корреляционного теческателья // *Megatech*. – 2011. – № 2. – С. 52–56.

9. Carter G. Coherence and time-delay estimation // *Proceedings of IEEE*. – 1987. – Vol. 75, Iss. 2. – P. 236–255.

10. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 265 с.

11. Аврамчук В.С. Реализация корреляционных алгоритмов определения положения трубопроводных утечек на микроконтроллерах Cortex / В.С. Аврамчук, В.А. Фаерман // Высокопроизводительные вычисления системы и технологии. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 17–20.

12. Papastefanou A.S. Experimental investigation into the characteristics of in-pipe leak noise in plastic water filled pipes / A.S. Papastefanou, Ph.F. Joseph, M.J. Brennan // *Acta Acustica united with Acustica*. – 2012. – Vol. 98. – P. 847–856.

13. A virtual pipe rig for testing acoustic detection correlators: proof of concept / M.J. Brennan, F. Kroll de Lima, F.C.L. de Almeida, P.F. Joseph, A.T. Paschoalini // *Applied Acoustics*. – 2016. – Vol. 102. – P. 137–145.

14. Faerman V. Concept and implementation of the laboratory bench for simulating the case of leak detection with the use of leak-noise correlator / V. Faerman, A. Tsavnin // *AIP Proceedings*. – 2019. – Vol. 2195. – id. 020006.

15. Water leakage monitoring education: Cross correlation study via spectral whitening / R. Ionel, S. Ionel, P. Bauer, F. Quint // *Proceedings of IECON 2014*. – Dallas: IEEE, 2014. – P. 2465–2471.

16. Бахурин С. Спектральный анализ на ограниченном интервале времени. Оконные функции [Электронный ресурс] // Теория и практика цифровой обработки сигналов. – URL: <http://www.dsplib.ru/content/win/win.html> (дата обращения: 21.01.2019).

Фаерман Владимир Андреевич

Преподаватель каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), член IEEE
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-9643-0245
Тел.: +7-923-44-350-44
Эл. почта: fva@fb.tusur.ru

Аврамчук Валерий Степанович

Д-р техн. наук, доцент, отделения автоматизации и робототехники (ОАР) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-5012-1826
Тел.: +7 (382-2) 70-63-50
Эл. почта: avs@tpu.ru

Faerman V.A., Avramchuk V.S.

Algorithms for real-time leak noise correlator

In the paper are discussed the modifications of a cross-correlation digital signals processing algorithm to ensure its operability application to real-time pipeline leak detection.

The distinguishing features of the proposed solution is an ability to recursively recalculate correlation function and normalization value after the acquisition of a new data segment. It makes computational costs comparatively low because no temporary data is stored and no extra computations are made. It makes the implementation of normal leak noise correlator's function set on portable single-board computers possible. Real-time operability of the algorithms is demonstrated via experimental study in MATLAB. The computer-generated leak noise signals were used to study the impact of the coefficient on the information capacity of the signal on the output of the correlator. Thus, low-resolution window function and high overlap coefficient are proved to be a good option for time-delay estimation in application to leak detection.

Keywords: leak noise correlator, correlation analysis, time delay estimation, MATLAB.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-20-26

References

1. Tikhonov V.I. *Optimallyy priem signalov* [Optimum signal receiving]. Moscow: Radio I Svyaz, 1983, 320 p. (in Russ.).

2. Carter C. Time delay estimation for passive sonar signal processing // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, vol. ASSP-29, no. 3, pp. 463–470.

3. Jian M., Kot A.C., Er M.H. Performance study of time-delay estimation in a room environment. *Proceeding of IEEE International Conference on Circuits and Systems*. Monterey, IEEE, 1998, pp. 554–558.

4. Fuchs H.V., R. Riehle. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. *Applied Acoustics*, 1991, vol. 33, iss. 1, pp. 1–19.

5. Ifeachor E., Jervis B. *Digital signal processing: practical approach*. Upper Saddle River (NJ), Prentice hall, 2004, 992 p.

6. Firsov A.A., Terentiev D.A. Algoritm povysheniya tochnosti lokacii pri korreljacion-nom techeiskanii, osnovannyj na analize funkcii vzaimno-go spektra [Algorithm for improving accuracy of leak detection based on analysis of cross-spectrum] // *Kontrol'. Diagnostika*, 2014, no. 8, pp. 23–27 (in Russ.).

7. Ma Y., Gao Y., Cui X., Brennan M., Almeida F., Yang J. Adaptive phase transform method for pipeline leakage detection // *Sensors*, 2019, vol. 19, iss. 2, URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/2/310>.

8. Koshkin S.Yu. Vybhor korreljacionnogo techeiskatelja [Selection of a leak noise correlator] // *Megatech*, 2011, no. 2, pp. 52–56 (in Russ.).

9. G. Carter. Coherence and time-delay estimation. *Proceedings of IEEE*, 1987, vol. 75, iss. 2, pp. 236–255.

10. Marple S.L. *Digital spectral analysis with applications*. Upper Saddle River (NJ), Prentice hall, 1987, 252 p.

11. Avramchuk V.S., Faerman V.A. Realizacija korreljacionnyh algoritmov opredelenija po-lozhenija truboprovodnyh utechek na mikrokontrollerah Cortex [Implementation of the correlation algorithms for locating pipeline leaks on microcontrollers Cortex-M3 and Cortex-M4] // *Vysokoproduktivnye vychislitelnye sistemy I tekhnologii*, 2018, vol. 2, no. 1, pp. 17–20 (in Russ.).

12. Papastefanou A.S., Joseph Ph.F., Brennan M.J. Experimental investigation into the characteristics of in-pipe leak noise in plastic water filled pipes // *Acta Acustica*, 2012, vol. 98, pp. 847–856.

13. Brennan M.J., Kroll de Lima F., de Almeida F.C.L., Joseph P.F., Paschoalini A.T. A virtual pipe rig for testing

acoustic detection correlators: proof of concept // *Applied Acoustics*, 2016, vol. 102, pp. 137–145.

14. Faerman V., Tsavnin A. Concept and implementation of the laboratory bench for simulating the case of leak detection with the use of leak-noise correlator // *AIP Proceedings*, 2019, vol. 2195, id. 020006.

15. Ionel R., Ionel S., Bauer P., Quint F. Water leakage monitoring education: Cross correlation study via spectral whitening // *Proceedings of IECON 2014*, Dallas, TX, USA, IEEE, 2014, pp. 2465–2471.

16. Bakhurin S. *Spektral'nyj analiz na ogranichennom intervale vremeni Okonnye funktsii* [Spectral analysis of finite duration signals] // *Teoriya i praktika tsivrfovoy obrabotki signalov*, 2019, URL: <http://wwiIn Russ.>

Vladimir A. Faermam

Lecturer, Department of Complex Information Security of Computer Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-9643-0245
Phone: +7-923-44-350-44
Email: fva@fb.tusur.ru

Valeriy S. Avramchuk

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor, Department of Automation and Robotics National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-5012-1826
Phone: +7 (382-2) 70-63-50
Email: avs@tpu.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

УДК 004.056:519.1

О.С. Авсентьев, А.Г. Кругов, П.А. Шелупанова

Функциональные модели процессов реализации угроз утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений объектов информатизации

Рассматривается подход к построению функциональных моделей процессов реализации угроз утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений радиоэлектронных устройств объектов информатизации, основанный на стратифицированном представлении таких процессов, отражающем связь между действиями нарушителя, выполняемыми на разных этапах описания в виде совокупности действий, соответствующих каждому из возможных вариантов реализации процессов рассматриваемого типа.

Ключевые слова: свойства информации, ценность информации, технический канал утечки информации, электрические характеристики радиоэлектронных устройств, побочные электромагнитные излучения, условия согласования разнородных характеристик.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-29-39

Объект информатизации (ОИ) – это совокупность информационных ресурсов, средств и систем обработки информации, используемых в соответствии с заданной информационной технологией, а также средств их обеспечения, помещений или объектов (зданий, сооружений, технических средств), в которых эти средства и системы установлены, или помещений и объектов, предназначенных для ведения конфиденциальных переговоров [1].

Использование ОИ рассматриваемого типа в различных сферах деятельности при обеспечении взаимодействия организаций, предприятий, а также организаций государственного сектора позволяет значительно повысить эффективность деятельности этих организаций. По решаемым задачам и выполняемым функциям ОИ организаций государственного сектора имеют ряд особенностей, обусловленных в первую очередь тем, что на этих объектах обрабатывается и передается информация государственного значения, подлежащая защите от угроз нарушения ее безопасности. В качестве основных факторов, обуславливающих возможность реализации этих угроз, следует отметить использование для реализации информационных процессов по обработке и передаче информации на ОИ сигналов различной физической природы. Кроме того, применение в структуре ОИ технических средств (ТС) на основе различного рода радиоэлектронных устройств (РЭУ) обуславливает излучения сигналов, функционально присущие этим ТС, а также побочные электромагнитные излучения (ПЭМИ) элементов этих ТС и ПЭМИ, модулированные информативным сигналом, сопровождающим работу РЭУ [1].

Указанные особенности обработки информации на ОИ обуславливают определенную направленность угроз ее безопасности на противоправные действия по реализации технических каналов утечки информации (ТКУИ) за счет ПЭМИ РЭУ ОИ и применение мер защиты, учитывающих динамику указанных действий.

Динамика противоправных действий заключается в следующем.

Выбор РЭУ в составе ТС ОИ осуществляется в процессе проектирования и разработки объекта (до начала эксплуатации) с учетом его назначения, вида обрабатываемой (подлежащей передаче) информации при обеспечении свойств, характеризующих ее ценность для легитимных пользователей, как обеспечивающего ресурса их деятельности [2]. Реализация процессов обработки и передачи информации (далее – информационных процессов (ИПр)) на ОИ осуществляется после ввода объекта в эксплуатацию. При этом временные характеристики реализации этих процессов (начало, продолжительность, окончание) носят случайный характер.

В соответствии с определением, приведенным в [3], ТКУИ включает источник (датчик) информации (ДИ), среду распространения информативного сигнала и разведывательный приемник, как техническое средство разведки (ТСР). При этом ДИ и часть среды распространения информативного сигнала располагаются в пределах контролируемой зоны (КЗ) ОИ. Остальные элементы ТКУИ могут располагаться как за пределами КЗ, так и в смежных с ОИ помещениях в пределах общей КЗ [4]. В условиях неопределенности относительно характеристик ИПр в процессе реализации ТКУИ нарушителем осуществляется выбор ТСР и места его применения с целью обеспечения свойств перехватываемой информации, характеризующих ее ценность для нарушителя и удовлетворяющих его требованиям.

До настоящего времени описательные модели процессов реализации ТКУИ, возникающих за счет ПЭМИ РЭУ ТС ОИ в условиях динамики их реализации нарушителем, не разрабатывались. Указанные обстоятельства практически исключают возможность учета этой динамики при обеспечении защиты информации на ОИ, что приводит к искажению результатов оценки ее защищенности от утечки. Это обусловлено большим количеством подлежащих учету характеристик сигналов как материальных носителей информации в пределах ОИ и в ТКУИ, характеристик РЭУ, используемых для обработки и пе-

редачи этих сигналов на ОИ, условий согласования этих характеристик и сложностью их вербального описания. Кроме того, в интересах количественной оценки защищенности информации от утечки возникает необходимость формирования в рамках таких моделей исходных данных, характеризующих динамику реализации таких ТКУИ. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость разработки соответствующих формализованных функциональных моделей ИПР как объекта защиты и процесса реализации ТКУИ рассматриваемого типа.

Общее описание угроз утечки информации по техническим каналам за счет ПЭМИ РЭУ ОИ

Угрозы утечки информации по техническим каналам за счет ПЭМИ РЭУ ОИ – это угрозы безопасности информации, связанные с реализацией нарушителем ТКУИ, возникающих за счет ПЭМИ РЭУ в составе ТС ОИ.

Рассмотрим элементы описания ТКУИ рассматриваемого типа.

К основным элементам описания такого рода ТКУИ относятся: РЭУ в составе ТС ОИ, используемые в качестве ДИ (источника информации в структуре ТКУИ), воздушная среда распространения информативного сигнала и разведывательные радиоприемники (РРП).

В составе ТС на ОИ для реализации ИПР применяются различные РЭУ. При этом в целях обеспечения свойств обрабатываемой (передаваемой) информации, характеризующих ее ценность для легитимных пользователей и удовлетворяющих требованиям обеспечиваемой деятельности, на ОИ формируется некоторая траектория, включающая различные РЭУ [5, 6]. Каждое РЭУ в этой траектории является источником ПЭМИ широкого частотного диапазона. Как отмечено в [7], характер этих излучений определяется назначением, схемными решениями, мощностью, материалами и конструкцией устройства. При прохождении информационных сигналов через РЭУ ОИ по выбранной траектории возникают ПЭМИ этих РЭУ, модулированные информативным (опасным) сигналом, которые могут быть использованы в качестве материальных носителей перехватываемой нарушителем при помощи РРП информации по возникающему при этом ТКУИ [8, 9].

В связи с особенностями функционирования ОИ, обусловленными разнообразием номенклатуры и разнородностью РЭУ, используемых в составе ТС ОИ, а также наличием многофакторных взаимосвязей между этими РЭУ у нарушителя появляется возможность реализации множества таких ТКУИ, имеющих различные характеристики [8]. Данное обстоятельство связано, с одной стороны, с отсутствием у

нарушителя возможности какого-либо влияния на структуру и условия функционирования ОИ и их РЭУ, с другой стороны, с отсутствием у легитимных пользователей ОИ возможности определения действий нарушителя в процессе реализации ТКУИ.

Нарушитель при выполнении этих действий руководствуется принципами ведения технической разведки (ТР), приведенными в [7].

В связи с тем, что передача информации по основному каналу связи между легитимными пользователями ограничена во времени, для него важное значение имеет реализация принципа оперативности ведения ТР, предполагающего динамичность процесса реализации перехвата и доставки информации в центр ее сбора и обработки. При этом ведение ТР может осуществляться с учетом динамики изменения обстановки, связанной с применением на ОИ мер защиты информации и различными условиями распространения информативных сигналов.

В структуре ТКУИ РЭУ в составе ТС ОИ используются в качестве физических преобразователей. Знание физических принципов действия такого рода преобразователей позволяет решать задачу определения характеристик побочных физических полей, образующих ТКУИ, и согласования характеристик этих полей с характеристиками РРП, используемых для перехвата информативных сигналов.

Для реализации процесса перехвата информации (ПрПИ) по ТКУИ нарушителю необходимо учитывать сведения об обрабатываемой на ОИ информации, о структуре и закономерностях функционирования ТС объекта, об используемых схемных и технологических решениях, о методах, способах и мерах защиты информации. С учетом этих сведений осуществляется выбор места расположения, тип и режимы работы РРП в целях обеспечения требований к свойствам перехватываемой информации.

Следует отметить важные обстоятельства, связанные с разнородностью обрабатываемой на ОИ информации, различиями характеристик используемых для этих целей РЭУ в составе ТС, а также их взаимосвязями в структуре ОИ, обуславливающие различные условия распространения ПЭМИ [10–12].

Как показано в [8], ТКУИ может быть представлен в виде типовой радиотехнической системы, представленной на рис. 1, где используются следующие обозначения: ДИ и ПИ – датчик и получатель информации; ПрУ и ОПрУ – преобразующее и обратное преобразующее устройства; ПРД и ПРМ – передающее и приемное устройства; АФУ ПРД и АФУ ПРМ – передающее и приемное антенно-фидерные устройства; ВС – воздушная среда распространения информативного сигнала [13].

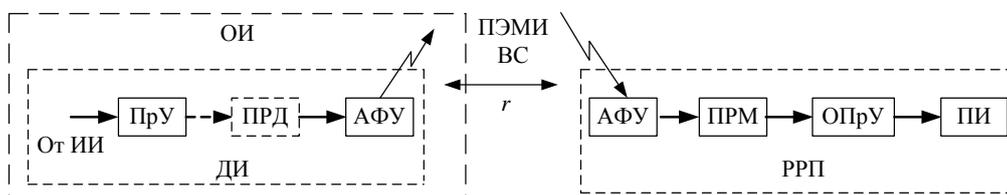


Рис. 1. Структура технического канала утечки информации за счет ПЭМИ

Обширную номенклатуру ДИ могут составлять микрофоны телефонных аппаратов, мониторы и оборудование средств вычислительной техники (СВТ), накопители, периферийные устройства, различные РЭУ в составе каналообразующей аппаратуры и др. [1, 4, 7].

На пути от ДИ до ПИ в различных элементах траектории реализации ТКУИ возможны преобразования сигналов из одного вида в другой. При этом ПЭМИ различных РЭУ в структуре ОИ могут иметь различные характеристики. Указанные обстоятельства также обуславливают определенные трудности для нарушителя по реализации действий, выполняемых с целью формирования ТКУИ рассматриваемого типа, связанные с выбором РРП и определением места его применения.

Для того чтобы какое-либо РЭУ могло использоваться в качестве ДИ в структуре ТКУИ, оно должно иметь соответствующие характеристики [7].

ДИ содержит элемент, чувствительный к информационным сигналам перехватываемой информации определенного вида (речевой, документальной, телекоммуникационной) в различной форме представления (акустические колебания, колебания электрического тока в аналоговом или цифровом виде). На выходе этого элемента (ПрУ, см. рис. 1) формируется электрический сигнал, модулированный информационным сигналом, поступающим от ИИ [7].

Кроме того, такой ДИ содержит элементы ПРД (с разрешающей способностью, линейностью, полосой частот и инерционностью), обеспечивающие формирование ПЭМИ, а также проводники, выполняющие роль антенно-фидерных устройств (АФУ). В качестве АФУ могут использоваться и проводники, соединяющие различные РЭУ в составе ТС ОИ. От конструктивных особенностей элементов ДИ, выполняющих роль АФУ, зависит вид диаграммы направленности ПЭМИ. Так, в [11] показано, что диаграмма направленности ПЭМИ компьютера отличается от круговой. Данное обстоятельство также может учитываться нарушителем при определении направления максимального уровня излучения ПЭМИ с целью выбора места расположения РРП, включающего АФУ, ПРМ, ОПрУ и устройство отображения перехватываемой информации (ПИ).

При этом характеристики этого РРП должны соответствовать характеристикам принимаемых сигналов ПЭМИ. В качестве электрических характеристик РРП рассматриваются $\mu_{\text{РРП}}$ чувствительность к принимаемым сигналам ПЭМИ, полоса пропускания $\Delta F_{\text{РРП}}$ и время обеспечения приема $\Delta t_{\text{РРП}}$. Основными характеристиками сигнала ПЭМИ при этом являются отношение сигнал / шум, $A_{\text{ПЭМИ}} / P_{\text{ш}}$ на входе РРП, ширина спектра частот $\Delta f_{\text{ПЭМИ}}$ и время $\Delta t_{\text{ПЭМИ}}$, в течение которого ПЭМИ с такими характеристиками может использоваться в качестве материального носителя перехватываемой информации. Условия согласования определяются в соответствии с [14, 15]:

$$\frac{A_{\text{ПЭМИ}}}{P_{\text{ш}}} \geq \mu_{\text{РРП}}, \quad (1)$$

$$\Delta F_{\text{РРП}} \geq \Delta f_{\text{ПЭМИ}}, \quad (2)$$

$$\Delta t_{\text{РРП}} \geq \Delta t_{\text{ПЭМИ}}. \quad (3)$$

На рис. 1 показано, что ДИ и часть воздушной среды распространения сигнала ПЭМИ располагаются в пределах КЗ ОИ и нарушитель не имеет возможности влияния на характеристики сигнала ПЭМИ в пределах этой зоны. Поэтому основными элементами, которыми может манипулировать нарушитель в процессе реализации ТКУИ, являются характеристики ВС среды распространения ПЭМИ за пределами ОИ и характеристики элементов РРП.

Сигналы при распространении в физической среде ослабляются. Ослабление ПЭМИ при его распространении в воздушной среде зависит от частоты излучения, типа трассы, расстояния r (зоны) от излучателя и характеризуется коэффициентом ослабления $K_o(r)$ [16], а также условиями распространения такого рода сигналов [17]. Известно множество подходов к расчету $K_o(r)$ в различных условиях распространения радиоволн [18]. В [16], например, приведены как приближенная «трехзонная», так и точные формулы для коэффициента ослабления ПЭМИ $K_o(r)$ по электрическому и магнитному полю. Однако в этих формулах не учитывается динамика процесса реализации ТКУИ, реализуемого нарушителем с целью перехвата информации.

В интересах исследования динамики процесса реализации ТКУИ рассмотрим приведенное в [17] выражение для определения радиочастотной энергетики радиолинии в условиях свободного пространства:

$$P_2 = (P_1 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \lambda^2) / (4\pi r^2), \quad (4)$$

где P_1 и P_2 – мощности радиосигнала на выходе ПРД и на входе ПРМ соответственно; η_1 и η_2 – коэффициенты полезного действия фидеров передающей и приемной антенн соответственно; $G_1 = D_1 \cdot \eta_{A1}$ и $G_2 = D_2 \cdot \eta_{A2}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно; η_{A1} и η_{A2} – коэффициенты направленного действия антенн; λ – длина волны электромагнитного излучения; r – расстояние между передающей и приемной антеннами.

Для ТКУИ, структура которого приведена на рис. 1, выражение (4) запишем в виде

$$P_2 = P_1 \cdot K_o(r), \quad (5)$$

где $K_o(r) = (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \lambda^2) / (4\pi r^2)$ – коэффициент ослабления сигнала ПЭМИ по мощности на пути распространения от ДИ до входного устройства ПРМ РРП.

Основными особенностями ПЭМИ в ТКУИ рассматриваемого типа являются:

– излучатели ПЭМИ могут быть точечными и распределенными [3, 7];

– ПЭМИ этих излучателей могут распространяться в однородной и в неоднородной среде. При этом диаграмма направленности ПЭМИ может отличаться от круговой [11];

– возможны отражения (переотражения) ПЭМИ от физических объектов и неоднородностей среды на пути их распространения [17].

Указанные особенности обуславливают динамику процесса реализации нарушителем ТКУИ за счет ПЭМИ РЭУ ТС ОИ.

Условия (1) и (2) на входе ПРМ могут выполняться частично или вообще не выполняться. Так, вид и характеристики (временные, энергетические и спектральные) излучаемого ПЭМИ в существенной степени определяются видом обрабатываемой на ОИ информации (речевая, документальная, телекоммуникационная) (массивы m_i) [7]. При этом в качестве ДИ в ТКУИ могут использоваться только РЭУ ТС ОИ, чувствительные к проходящим через них информационным сигналам соответствующего массива m_i . Геометрические размеры ДИ как излучателей ПЭМИ, а также соединяющих их проводников как своего рода микроантенн, определяют направленность излучения и его энергетика (η_l, G_l, P_l) [19].

Вид диаграммы направленности излучения в существенной степени зависит от его частотного спектра и конструктивных особенностей РЭУ ОИ. Эта зависимость определяется соотношением геометрических размеров АФУ излучателей ПЭМИ ($D_{ПЭМИ}$) и длины волны (спектра) излучения ($\lambda_{ПЭМИ}$). При $D_{ПЭМИ} < \lambda_{ПЭМИ} / 2$ нарушаются условия согласования излучателя ПЭМИ со средой их распространения и диаграмма направленности излучения близка к круговой. При $D_{ПЭМИ} \geq \lambda_{ПЭМИ} / 2$ направленность излучения определяется расположением излучателя в пространстве и может отличаться от круговой. С увеличением частоты $f_{ПЭМИ}$ эта зависимость проявляется все в большей степени [19]. Это приводит к необходимости поиска нарушителем места для расположения РРП с целью определения направления максимальной мощности излучения ПЭМИ. В условиях неопределенности нарушителя относительно структурных элементов ОИ поиск места размещения РРП может занять достаточно много времени. Место применения РРП в процессе реализации ТКУИ определяется в зависимости от расстояния r с учетом выполнения условия (1), а выбор типа РРП осуществляется с учетом выполнения условия (2). При этом проверка выполнения условий (1) и (2) требует времени. Указанные обстоятельства обуславливают динамику процесса реализации нарушителем ТКУИ рассматриваемого типа. В этих условиях будем считать процесс ПрПИ перехвата информации реализованным при выполнении условия (3).

В свою очередь, условие (3) будем считать выполненным при одновременном выполнении условий (1) и (2). При этом действия нарушителя по выполнению этих условий могут происходить как последовательно, так и параллельно, а времена их выполнения являются случайными.

Следует отметить, что процесс ПрПИ перехвата информации может быть реализован только тогда,

когда сигнал, воздействующий на ДИ, является носителем информации и ИПР информационный процесс на ОИ реализуется.

В связи с неопределенностью нарушителя относительно временных характеристик ИПР время его реализации определим как сумму времен τ_{st} по настройке ТС ОИ в штатном режиме, τ_{ex} ожидания передачи и τ_{tr} передачи информации на ОИ:

$$\tau_{ИПР} = \tau_{st} + \tau_{ex} + \tau_{tr}. \quad (6)$$

В соответствии с рассмотренными ранее действиями нарушителя по реализации ТКУИ за счет ПЭМИ РЭУ ОИ время $\tau_{ПрПИ}$ реализации процесса перехвата информации определим как сумму времен $\tau_{(1)}$ и $\tau_{(2)}$ реализации действий, направленных на выполнение условий (1) и (2) (при последовательном или параллельном их выполнении) и времени τ_{app} перехвата информации:

$$\tau_{ПрПИ} = \tau_{(1)} + \tau_{(2)} + \tau_{app}, \quad (7)$$

$$\tau_{ПрПИ} = \max(\tau_{(1)}, \tau_{(2)}) + \tau_{app}. \quad (8)$$

При этом время $\tau_{(1)}$ включает время τ_{pl} выбора места применения РРП с точки зрения скрытности (в соответствии с r_{min} минимально возможным расстоянием до КЗ), время τ_{in} сканирования по частоте, время τ_{dir} определения направления максимального уровня излучения (диаграммы направленности АФУ ДИ) и время τ_{cor} корректирования места применения РРП (с учетом расстояния r), обеспечивающего выполнение условия (1). С учетом последовательного выполнения этих действий запишем:

$$\tau_{(1)} = \tau_{pl} + \tau_{in} + \tau_{dir} + \tau_{cor}. \quad (9)$$

Время $\tau_{(2)}$ включает время τ_{mod} выбора режима работы РРП и время τ_{cu} настройки этого режима с учетом спектра сигнала ПЭМИ:

$$\tau_{(2)} = \tau_{mod} + \tau_{cu}. \quad (10)$$

Перехват информации считается успешным при выполнении условий:

$$\tau_{(1)} + \tau_{(2)} < \tau_{ИПР}. \quad (11)$$

$$\tau_{app} > \tau_{ИПР}^*, \quad (12)$$

$$\tau_{ИПР}^* \geq \tau_{ИПР}^{tr}, \quad (13)$$

где $\tau_{ИПР}^* = \tau_{ИПР} \cdot K_{ИПР}$, $0 \leq K_{ИПР} \leq 1$; $K_{ИПР}$ – коэффициент, характеризующий часть перехваченной информации ИПР при выполнении условий (1) и (2); $\tau_{ИПР}^{tr}$ – часть информационного процесса, перехват информации в которой удовлетворяет требованиям нарушителя.

Легитимным пользователям для защиты информации от утечки за счет ПЭМИ ТС ОИ необходимо применять меры защиты в целях противодействия реализации нарушителем ТКУИ рассматриваемого типа.

С учетом (11) – (13) условие обеспечения защиты информации от утечки запишем в виде

$$(\tau_{(1)} + \tau_{(2)}) > (1 - K_{ИПР}) \cdot \tau_{ИПР} \quad (14)$$

На рис. 2 и 3 представлены временные диаграммы выполнения нарушителем действий в соответствии с выражениями (7) и (8).

Таким образом, реализация угрозы утечки информации по ТКУИ за счет ПЭМИ РЭУ ОИ от начала ее реализации до момента окончания перехвата информации определяется суммарным временем выполнения каждого действия, в совокупности составляющих процесс ПрПИ с учетом обеспечения выполнения условия (3).

Значения временных характеристик всех действий, приведенных на рис. 3 и 4, случайны. Однако усредненные их значения могут быть определены либо экспертным путем, либо с использованием сведений о технических характеристиках ТС и РРП, применяемых для реализации процессов ИПР и ПрПИ.

В табл. 1 приведены примерные значения временных характеристик действий, составляющих процессы ИПР и ПрПИ для выделенного помещения, предназначенного для проведения мероприятий с применением ТС звукоусиления и связи для передачи речевой информации.

В описательной модели процесса реализации угрозы утечки информации по техническим каналам за счет ПЭМИ РЭУ ОИ могут быть учтены штатные меры защиты информации, реализуемые в процессе проектирования ОИ, такие как экранирование и заземление экранов РЭУ и соединительных линий ТС,

ограничение уровней информационных сигналов, передаваемых через структурные элементы ОИ, и др. Применение этих мер позволит снизить уровень ПЭМИ, что, в свою очередь, может привести к увеличению временных характеристик действий нарушителя, направленных на обеспечение выполнения условий (1) и (2) при реализации процесса ПрПИ.

Наряду с временными характеристиками, приведенными в табл. 1, в описательной модели должны быть представлены и амплитудно-частотные характеристики информационных сигналов, используемых для передачи информации по траектории РЭУ ОИ и обуславливающих соответствующие характеристики ПЭМИ этих РЭУ, энергетику радиолинии в ТКУИ и возможность обеспечения требований нарушителя к свойствам перехватываемой информации. В рамках описательной модели устанавливаются также соответствия характеристик информативных сигналов ПЭМИ и РРП, обеспечиваемые при выполнении противоправных действий, связанных с условиями (1) и (2).

При описании угрозы рассматриваемого типа может быть указан способ преодоления меры защиты. В качестве недостатков такой модели следует отметить следующие: отсутствие детализации выполняемых нарушителем действий, характеризующей возможность такой реализации; сложность учета применения дополнительных мер защиты организационного, оперативного или оперативно-технического характера, направленных на локализацию действий нарушителя по обнаружению ПЭМИ и определению места применения РРП.

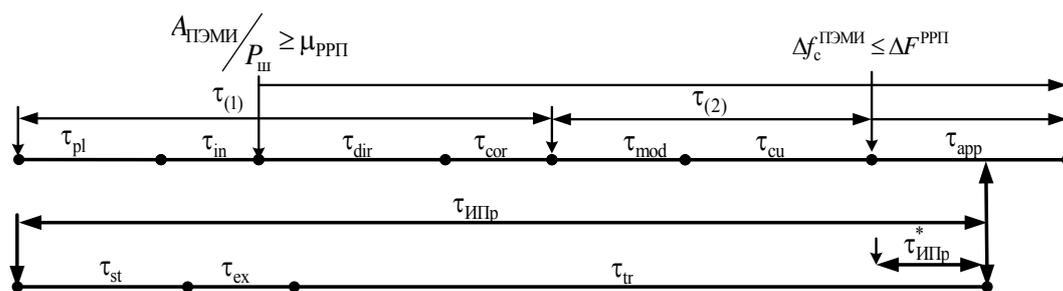


Рис. 2. Временные диаграммы процессов передачи информации на объекте информатизации и реализации ТКУИ при последовательном выполнении действий, обеспечивающих реализацию

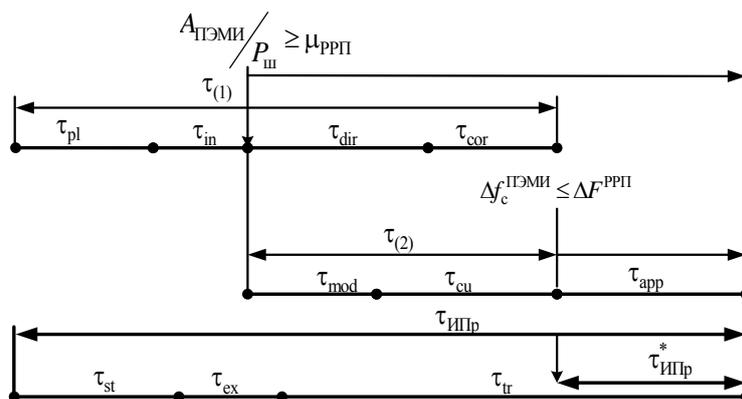


Рис. 3. Временные диаграммы процессов передачи информации на объекте информатизации и реализации ТКУИ при параллельном выполнении действий, обеспечивающих реализацию

Временные характеристики действий, составляющих процессы ИПр и ПрПИ

№ п/п	Название характеристики и ее обозначение	Способ определения	Минимальное значение, мин	Максимальное значение, мин	Среднее значение, мин
1	Время настройки ТС ОИ в заданном режиме – τ_{st}	Технические характеристики ТС	10	15	12,5
2	Время ожидания передачи – τ_{ex}	Эксперт	5	10	7,5
3	Время передачи информации на ОИ – τ_{tr}	Эксперт (на основе регламента)	30	40	35
4	Время работы РРП в режим сканирования по частоте – τ_{in}	Технические характеристики РРП	8	12	10
5	Время определения направления максимального уровня излучения – τ_{dir}	Эксперт	5	7	6
6	Время определения места применения РРП – τ_{ch}	Эксперт	6	10	8
7	Время выбора режима работы РРП – τ_{mod}	Технические характеристики РРП	1	2	1,5
8	Время настройки РРП в выбранном режиме – τ_{cu}	Технические характеристики РРП	2	3	2,5
9	Часть информационного процесса, перехват информации, в которой удовлетворяет требованиям нарушителя, – $\tau_{ИПр}^{тр}$	Эксперт	1,5	2	1,75

Сведения, содержащиеся в описательной модели процессов реализации угроз утечки информации по техническим каналам за счет ПЭМИ РЭУ ОИ, служат основой для разработки функциональных моделей этих процессов и используются при разработке моделей оценки защищенности информации на ОИ.

Следует отметить, что невозможно разработать единую модель оценки защищенности информации на ОИ различного назначения. Для каждого объекта и применяемой меры защиты информации (штатной или дополнительной) необходимо разрабатывать оригинальную модель. При этом, поскольку для различных ОИ состав и последовательность действий, выполняемых нарушителем в процессе реализации ТКУИ рассматриваемого типа в условиях применения легитимными пользователями разных мер защиты, отличается, то функциональные модели процесса реализации угрозы также отличаются.

Функциональные модели процессов реализации угроз утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений радиоэлектронных устройств объектов информатизации

Для оценки возможностей реализации угроз рассматриваемого типа с учетом временного фактора для конкретного ОИ необходимо определить время выполнения действий, составляющих процесс реализации угрозы, и их последовательность. Применительно к угрозам утечки информации по ТКУИ, возникающим за счет ПЭМИ РЭУ ОИ, такие модели ранее не разрабатывались. Характеристика действий, выполняемых в ходе реализации процессов перехвата информации по ТКУИ рассматриваемого типа, давалась без детализации условий их выполнения в ходе моделирования с использованием аппарата марковских [20], полумарковских процессов [21] и сетей Петри–Маркова [22] в виде описаний соответствующих схем. Функциональные модели процессов ре-

ализации угроз утечки информации по ТКУИ рассматриваемого типа с учетом этих условий также не разрабатывались.

В данной работе предложен подход к разработке такого рода функциональных моделей, основанный на стратифицированном представлении таких процессов (рис. 4) с выделением уровней (этапов) реализации и определением связей между ними в структуре ТКУИ в целом [23, 24].

При таком представлении обеспечивается возможность отражения связей между действиями, выполняемыми на разных стратах описания моделируемого процесса, и по аналогии с [24] может быть сформирована совокупность действий для каждого возможного варианта реализации ТКУИ за счет ПЭМИ РЭУ ОИ. В результате выполнения действий на всех стратах создаются условия для отображения перехваченной информации в устройстве отображения ПИ.

На страте 1 осуществляются действия по выбору места применения РРП с учетом обеспечения r_{min} минимально возможного расстояния до КЗ.

Страта 2 соответствует обнаружению ПЭМИ различных РЭУ в структуре ОИ, используемых в качестве ДИ в ТКУИ, путем применения имеющихся РРП в режиме сканирования диапазона частот.

При этом выполняется условие (1), но возможно, что не выполняется условие (2), поскольку характеристики выбранного режима работы РРП могут не соответствовать характеристикам сигнала ПЭМИ.

Следующая страта соответствует действиям по определению направления максимального уровня ПЭМИ с использованием АФУ направленного действия в составе РРП. При этом возможно корректирование в соответствии с расстоянием r от ДИ места применения РРП с последующим (или параллельным) выбором режима работы РРП с целью обеспечения выполнения условия (2).

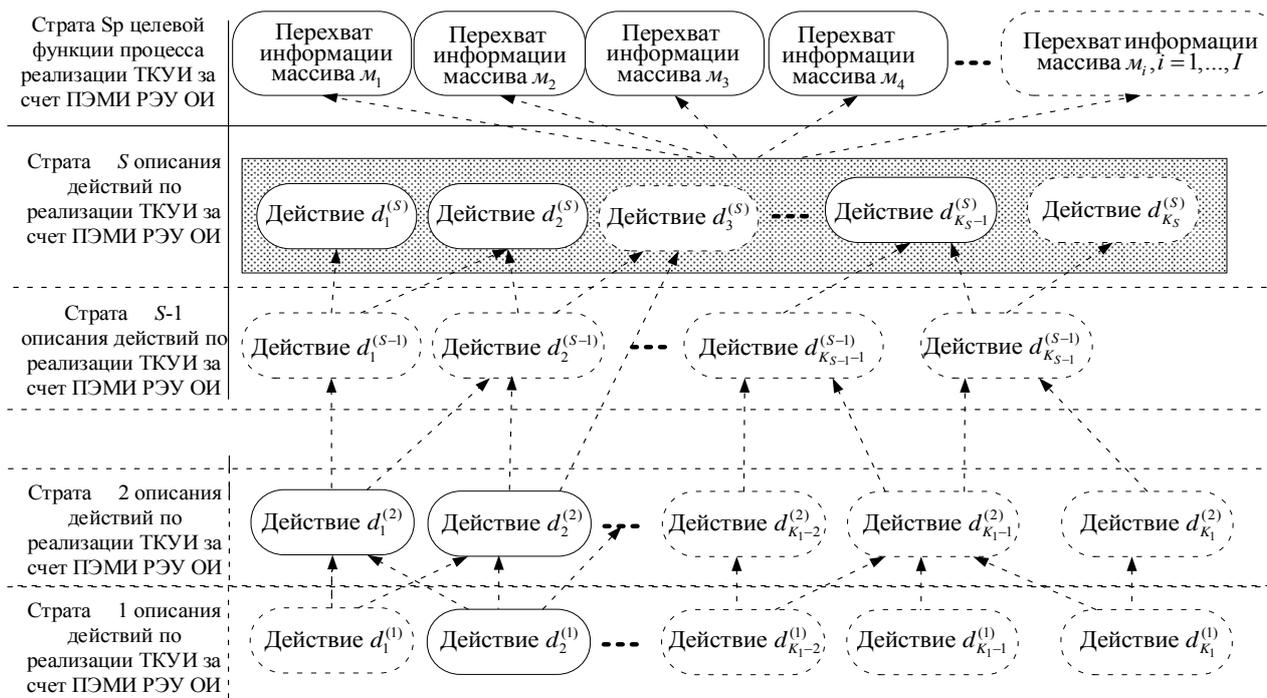


Рис. 4. Иллюстрация стратифицированного описания процесса реализации угроз утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений радиоэлектронных устройств объекта информатизации

Страта ($S-1$) соответствует выполненному условию (1). На страте S определяется выполнение совокупности условий (например, условий (1) и (2)) для реализации процесса перехвата информации. На заключительной страте осуществляется проверка выполнения требований к свойствам перехваченной информации (условие (3)) того или иного вида (массива $m_i, i=1, 2, \dots, I$) и ее отображение ПИ. Из рисунка видно, что для реализации процесса перехвата информации того или иного вида, например речевой информации в аналоговой форме представления с диапазоном воспроизводимых частот, соответствующим каналу тональной частоты ($\Delta f = 0,3-3,4$ кГц), возможно выполнение различных последовательностей действий на стратах описания этого процесса.

Совокупности действий определяют условия реализации процесса перехвата информации различного вида. Например, к таким совокупностям действий могут относиться:

$$\begin{aligned}
 & d_1^{(1)} \rightarrow d_1^{(2)} \rightarrow d_1^{(S-1)} \rightarrow d_1^{(S)} \rightarrow d_{m_1}^{(Sp)}; \\
 & (d_2^{(1)} \rightarrow d_1^{(2)} \rightarrow d_2^{(S-1)}) \& (d_2^{(1)} \rightarrow d_2^{(2)} \rightarrow d_2^{(S-1)}) \rightarrow d_2^{(S)} \rightarrow d_{m_2}^{(Sp)}; \\
 & (d_2^{(1)} \rightarrow d_2^{(2)}) \& (d_2^{(1)} \rightarrow d_1^{(2)} \rightarrow d_2^{(S-1)}) \rightarrow d_3^{(S)} \rightarrow d_{m_3}^{(Sp)} \dots; \\
 & \left(d_{K_1-2}^{(1)} \rightarrow d_{K_2-2}^{(2)} \right) \& \left(d_{K_1-2}^{(1)} \rightarrow d_{K_2-1}^{(2)} \right) \rightarrow d_{K_{S-1}-1}^{(S-1)} \rightarrow \\
 & \quad \rightarrow d_{K_S-1}^{(S)} \rightarrow d_{m_4}^{(Sp)}; \\
 & \left(d_{K_1}^{(1)} \rightarrow d_{K_2-1}^{(2)} \rightarrow d_{K_{S-1}}^{(S-1)} \right) \& \left(d_{K_1}^{(1)} \rightarrow d_{K_2}^{(2)} \rightarrow d_{K_{S-1}}^{(S-1)} \right) \rightarrow \\
 & \quad \rightarrow d_{K_S}^{(S)} \rightarrow d_{m_5}^{(Sp)}.
 \end{aligned}$$

Некоторые из таких совокупностей представляют композицию действий, выполняемых параллельно и независимо одно от другого. Это усложняет оценку общего времени реализации угрозы рассматриваемого типа.

В качестве примера можно привести графическую интерпретацию параллельно выполняемых действий по обеспечению условий (1) и (2), представленную на рис. 3.

На рис. 4 эти условия могут быть иллюстрированы в виде совокупности действий:

$$d_2^{(1)} \rightarrow (d_2^{(2)} \rightarrow d_2^{(S-1)}) \& (d_2^{(2)} \rightarrow d_3^{(S)}) \rightarrow d_3^{(S)} \rightarrow d_{m_i}^{(Sp)} \dots$$

Таким образом, для каждого варианта описания процесса реализации ТКУИ рассматриваемого типа может быть определена композиция возможных совокупностей действий, выполненных на предыдущих стратах описания этого процесса и направленных на создание условий для его реализации.

Формально функциональная модель процесса реализации ТКУИ за счет ПЭМИ РЭУ ОИ может быть представлена как совокупность трех множеств [24]

$$\Phi_u = \{ \mathbf{D}_u, \mathbf{M}(\mathbf{D}_u), \mathbf{Y}(\mathbf{D}_u) \}, u = \overline{1, U}, \quad (15)$$

где \mathbf{D}_u – множество действий $\mathbf{d}_u^{(k)} \in \mathbf{D}_u, k = \overline{1, K}$, выполняемых для реализации u -го варианта ТКУИ; K – мощность множества \mathbf{D}_u ; $\mathbf{M}(\mathbf{D}_u)$ – матрица взаимосвязей действий $\mathbf{d}_u^{(k)}$ в порядке их выполнения; $\mathbf{Y}(\mathbf{D}_u)$ – совокупность условий для выполнения действий $\mathbf{d}_u^{(k)} \in \mathbf{D}_u$, при которых реализация u -го варианта ТКУИ возможна.

С использованием такого представления могут быть разработаны функциональные модели процессов реализации ТКУИ за счет ПЭМИ РЭУ ОИ, включающие совокупности подлежащих выполнению действий по обеспечению согласования разнородных характеристик сигналов ПЭМИ с соответствующими характеристиками РРП, учитывающие взаимосвязи этих действий, условия их выполнения, а также примерные оценки времени выполнения каждого действия.

В качестве примера на рис. 5 приведена функциональная модель варианта последовательно выполняемых нарушителем действий в процессе реализации перехвата речевой информации, циркулирующей в выделе-

нном помещении, предназначенном для проведения мероприятий с применением ТС звукоусиления и связи.

В левом столбце матрицы $M(D_{1,1})$ взаимосвязей на этом рисунке указаны номера выполняемых действий, в верхней строке – номера последующих действий. Условия выполнения этих действий не определены: множество $Y(D_{1,1})$ – пустое.

На рис. 6 представлена функциональная модель, соответствующая параллельному выполнению действий по реализации процесса ПрПИ.

Обозначение и описание действий, выполняемых в ходе моделируемого варианта процесса реализации угрозы – приведены в табл. 2.

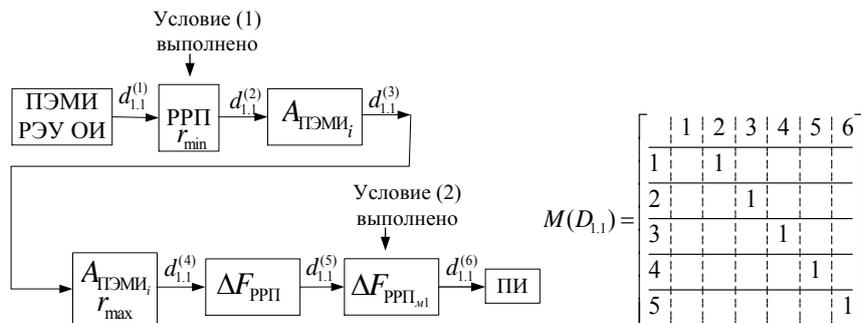


Рис. 5. Функциональная модель варианта последовательно выполняемых нарушителем действий в процессе реализации перехвата речевой информации, циркулирующей в выделенном помещении. Без мер защиты

Таблица 2

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

Наименование угрозы	Содержание действий, выполняемых при реализации угрозы	Обозначение действий	Время выполнения действий, мин
Вариант № 1			
Реализация процесса перехвата речевой информации, циркулирующей в выделенном помещении, оборудованном средствами звукоусиления и связи	Нарушитель выбирает место применения РРП ($r = r_{\min}$), при котором обеспечиваются условия скрытности	$d_{1,1}^{(1)}$	8–12
	Выполнено сканирование частотного диапазона при условии, соответствующем формуле (1)	$d_{1,1}^{(2)}$	3–5
	С использованием направленной антенны определено направление максимального уровня излучения ПЭМИ	$d_{1,1}^{(3)}$	5–7
	Скорректировано расстояние ($r = r_{\max}$) применения РРП, при котором обеспечивается скрытность его применения	$d_{1,1}^{(4)}$	8–12
	Выбран режим работы, обеспечивающий соответствие характеристик РРП характеристикам перехватываемого сигнала ПЭМИ с целью выполнения условия, соответствующего формуле (2)	$d_{1,1}^{(5)}$	3–5
	Выполнена проверка свойств перехваченной информации в соответствии с условиями (11)–(13)	$d_{1,1}^{(6)}$	5–10

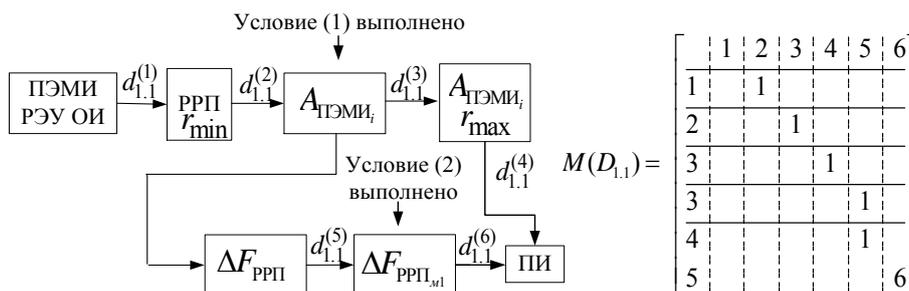


Рис. 6. Функциональная модель варианта параллельно выполняемых нарушителем действий в процессе реализации перехвата речевой информации, циркулирующей в выделенном помещении. Без мер защиты

Сравнивая данные табл. 1 и 2, определим степень соответствия свойств перехваченной информации требованиям нарушителя для функциональной схемы на рис. 6:

$$\tau_{ИПр} \approx 35 \text{ мин}; \tau_{ПрПИ} \approx 34 \text{ мин}; \tau_{ИПр}^* \approx 1 \text{ мин}.$$

Процесс ПрПИ в рассматриваемых условиях не реализован.

При параллельном выполнении нарушителем некоторых действий, направленных на обеспечение условий (1) и (2), время реализации процесса ПрПИ сокращается на 4 минуты, что соответствует $\tau_{ИПр}^* \approx 5 \text{ мин}$, и перехват информации нарушителем можно считать реализованным успешно.

Заключение

Функциональное моделирование используется для предварительной формализации исследуемых процессов. Однако представленные функциональные модели по аналогии с [25, 26] могут служить основой для разработки с использованием аппарата сетей Петри-Маркова аналитических моделей динамики реализации угроз утечки информации по техническим каналам за счет ПЭМИ РЭУ ОИ, учитывающих вероятностно-временные характеристики действий, выполняемых последовательно-параллельно, и при наличии определенных логических условий, адекватно отражающих процессы реализации угрозы для конкретного ОИ и позволяющих получить аналитические соотношения для расчета показателей защищенности информации от утечки как в условиях применения мер защиты, так и без применения этих мер.

Литература

- ГОСТ Р 51275–2006. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения [Электронный ресурс] / Утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2006 г. № 374-ст. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-51275-2006>.
- Авсентьев О.С. Формирование обобщенного показателя ценности информации в каналах связи / О.С. Авсентьев, А.О. Авсентьев // Вестник Воронежского института МВД России. – 2015. – № 2. – С. 55–63.
- Хорев А.А. Техническая защита информации: учеб. пособие для студентов вузов: в 3 т. – Т. 1: Технические каналы утечки информации / под ред. Ю.Н. Лаврухина. – М.: НПЦ «Аналитика», 2008. – 436 с.
- Специальные требования и рекомендации по технической защите конфиденциальной информации (СТР-К), утв. приказом Гостехкомиссии России от 30.08.2002 № 282 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rfcmd.ru/sphider/docs/InfoSec/RD_FSTЕК_requirements.htm, свободный (дата обращения: 25.02.2019).
- Авсентьев О.С. Моделирование и оптимизация процессов передачи и защиты информации в каналах связи / О.С. Авсентьев, В.В. Меньших, А.О. Авсентьев // Специальная техника. – 2015. – № 5. – С. 47–50.
- Авсентьев О.С. Модель оптимизации процесса передачи информации по каналам связи в условиях угроз ее безопасности / О.С. Авсентьев, В.В. Меньших,

А.О. Авсентьев // Телекоммуникации. – 2016. – № 1. – С. 28–32.

7. Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок: учеб. пособие / под ред. Ю. Н. Лаврухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 536 с.

8. Авсентьев О.С. Математическая модель защиты информации от утечки по электромагнитным каналам / О.С. Авсентьев, А.Г. Вальде, А.Г. Кругов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2016. – № 3. – С. 42–50.

9. Авсентьев О.С. Исследование взаимосвязей между электрическими параметрами информационных сигналов при обосновании показателя защищенности информации от утечки по электромагнитным каналам / О.С. Авсентьев, А.О. Авсентьев, А.Г. Кругов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2017. – № 2. – С. 125–135.

10. Авдеев В.Б. К расчету уровней побочных электромагнитных излучений технических средств, входящих в состав персональных компьютеров // Телекоммуникации. – 2006. – № 2. – С. 40–44.

11. Антипов Д.А. Исследование направленности побочного электромагнитного излучения от персонального компьютера / Д.А. Антипов, А.А. Шелупанов // Доклады ТУСУР. – 2018. – № 2. – С. 33–37.

12. Хорев А.А. Оценка возможности обнаружения побочных электромагнитных излучений видеосистемы компьютера // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 2. – С. 207–213.

13. Никольский Б.А. Основы радиотехнических систем [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. дан. (3,612 Мбайт). – Самара, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

14. Теория электрической связи: учеб. пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под общ. ред. К.К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с.

15. Авсентьев О.С. Обоснование показателя защищенности информации от утечки по электромагнитным каналам / О.С. Авсентьев, А.Г. Кругов // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 59–64.

16. Авдеев В.Б. Расчет коэффициента ослабления побочных электромагнитных излучений / В.Б. Авдеев, А.Н. Катруша // Специальная техника. – 2013. – № 2. – С. 18–27.

17. Кубанов В.П. Влияние окружающей среды на распространение радиоволн. – Самара: ПГУТИ, 2013. – 92 с.

18. Авдеев В.Б. Сравнительная оценка методических подходов к расчету отношения сигнал/шум в задачах контроля защищенности информации от утечки за счёт побочных электромагнитных излучений / В.Б. Авдеев, А.В. Анищенко // Специальная техника. – 2016. – № 1. – С. 54–63.

19. Смирнов В.В. Устройства СВЧ и антенны: учеб. пособие / В.В. Смирнов, В.П. Смолин; Балт. Гос. техн. ун-т. – СПб., 2012 – 188 с.

20. Тихонов В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Советское радио, 1977. – 488 с.

21. Сильверстов Д.С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний. – М.: Сов. радио, 1980. – 272 с.

22. Игнагьев В.М. Сети Петри–Маркова / В.М. Игнагьев, Е.В. Ларкин. – Тула: ТулГТУ, 1994.

23. Буравцев А.В. Стратифицированный метод построения сложной системы // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – № 3(20). – С. 23–32.

24. Авсентьев О.С. Функциональные модели процессов реализации угроз электронному документообороту /

О.С. Авсентьев, А.О. Авсентьев, И.О. Рубцова // Вестник ВИ МВД. – 2019. – № 4. – С. 40–50.

25. Язов Ю.К. Основы методологии количественной оценки эффективности защиты информации в компьютерных системах / Ю.К. Язов. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – 274 с.

26. Авсентьев О.С. К вопросу об оценке эффективности защиты информации в системах электронного документооборота / О.С. Авсентьев, И.О. Рубцова, Ю.К. Язов // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 1(29). – С. 25–34.

Авсентьев Олег Сергеевич

Д-р техн. наук, проф. каф. информационной безопасности Воронежского института МВД России
Патриотов пр-т, 53, г. Воронеж, Россия, 394065
Тел.: +7 (473-2) 00-52-44; +7-903-655-55-14
Эл. почта: osaos@mail.ru

Кругов Артем Геннадьевич

Главный специалист Центра информационных технологий, связи и защиты информации УМВД России по Тверской обл.
Мира пл., д. 1/70, г. Тверь, Россия, 170100
Тел.: +7 (482-2) 32-93-93; +7-920-697-18-68
Эл. почта: krtemik@gmail.com

Шелупанова Полина Александровна

Канд. экон. наук, доцент каф. безопасности информационных систем ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-39-39
Эл. почта: pi6-mne@yandex.ru

Avsentev O.S., Krugov A.G., Shelupanova P.A.

Functional models of processes for implementing information leakage threats due to side electromagnetic radiation of informatization objects

The approach to constructing functional models of the processes of implementing threats of information leakage through technical channels due to the side electromagnetic radiation of electronic devices of informatization objects is considered, based on the stratified representation of such processes, which reflects the relationship between the actions of the intruder carried out on different description strata in the form of a set of actions corresponding to each of the possible options for the implementation of processes of the type in question.

Keywords: technical channel of information leakage, incident electromagnetic radiation, functional model, information transmission path, signal characteristics, object of informatization, electronic device.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-29-39

References

1. GOST R 51275–2006. Protection of information. The object of informatization. Factors affecting information. General Provisions. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-51275-2006> (Accessed: March 11, 2020) (in Russ.).

2. Avsentev O.S., Avsentev A.O. *Formirovaniye obobshchennogo pokazatelya tsnennosti informatsii v kanalakh svyazi* [The formation of the information value generalized index in

the communication channels]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2015, no. 3, pp. 55–63 (in Russ.).

3. Khorev A.A. *Tekhnicheskaya zashchita in-formatsii: uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov: v 3 t. – T. 1: Tekhnicheskiye kanaly utechki informatsii* [Technical protection of information: a textbook for university students: 3 vols., vol. 1: Technical channels for information leakage]. Ed. Yu.N. Lavrukhnina]. M., SPC «Analytics», 2008. 436 p. (in Russ.).

4. «Special requirements and recommendations for the technical protection of confidential information (STR-K)», approved by order of the State Technical Commission of Russia of August 30, 2002 No. 282. Available at: http://www.rfcmd.ru/sphider/docs/InfoSec/RD_FSTEK_requirements.htm. (Accessed: March 16, 2020) (in Russ.).

5. Avsentev O.S., Menshikh V.V., Avsentev A.O. *Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov peredachi i zashchity informatsii v kanalakh svyazi* [Modeling and optimization of information transmission and protection processes in communications channels]. *Special Technique*, 2015, no. 5, pp. 47–50 (in Russ.).

6. Avsentev O.S., Menshikh V.V., Avsentev A.O. *Model' optimizatsii protsessa peredachi informatsii po kanalam svyazi v usloviyakh ugroz yeye bezopasnosti* [Process optimization model of information transfer through communication channels under threat conditions for its security]. *Telecommunications*, 2016, no. 1, pp. 28–31 (in Russ.).

7. Menshakov Yu.K. *Teoreticheskiye osnovy tekhnicheskikh razvedok : ucheb. posobiye* [Theoretical foundations of technical intelligence, tutorial, ed. Yu.N. Lavrukhnina]. M., Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2008. 536 p. (in Russ.).

8. Avsentev O.S., Valde A.G., Krugov A.G. *Matematicheskaya model' zashchity informatsii ot utechki po elektromagnitnym kanalams* [The mathematical model of information protection from leakage through electromagnetic channel]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2016, no. 3, pp. 42–50 (in Russ.).

9. Avsentev O.S., Avsentev A.O., Krugov A.G. *Issledovaniye vzaimosvyazey mezhdu elektricheskimi parametrami informatsionnykh signalov pri obosno-vanii pokazatelya zashchishchennosti informatsii ot utechki po elektromagnitnym kanalams* [The research of the interrelationships between electrical parameters of information signals in the justification of increased security against leakage of information by electromagnetic channels]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2017, no. 2, pp. 125–135 (in Russ.).

10. Avdeev V.B. *K raschetu urovney pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniye tekhnicheskikh speditiv, vkhodyashchikh v sostav personal'nykh komp'yutepov* [To the calculation of the level of spurious electromagnetic emissions of technical equipment that are part of personal computers]. *Telecommunications*, 2006, no. 2, pp. 40–44 (in Russ.).

11. Antipov D.A., Shelupanov A.A. *Issledovaniye napravlenosti pobochnogo elektromagnitnogo izlucheniya ot personal'nogo komp'yutera* [Investigation of the directivity of incidental electromagnetic radiation from a personal computer]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, no. 2, pp. 33–37 (in Russ.).

12. Khorev A.A. *Otsenka vozmozhnosti obnaruzheniya pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniye videosistemy komp'yutera* [Assessment of the possibility of detecting incidental electromagnetic radiation of a computer video system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 2, pp. 207–213 (in Russ.).

13. Nikolsky B.A. *Osnovy radiotekhnicheskikh sistem (elektron. Uchebnik)* [Fundamentals of radio systems (electron.

textbook) [Electronic resource] Ministry of Education and Science of Russia, Samar. state aerospace. un-t them. S.P. Koroleva (National Research University). The electron. text and graph. Dan. (3.612 MB), Samara, 2013, 1 opt. disk (CD-ROM) (in Russ.).

14. Glushkov V.A., Dormidontov A.V. Nesterenko A.G. *Teoriya elektricheskoy svyazi: uchebnoye posobiye* [Theory of electrical communication, tutorial, general. ed. K.K. Vasiliev]. Ulyanovsk, UISTU, 2008. 452 p. (in Russ.).

15. Avsentev O.S., Krugov A.G. *Obosnovaniye pokazatelya zashchishchennosti informatsii ot utechki po elektromagnitnym kanalam* [Rationale for increased DLP index to protect information from leakage via electromagnetic channels]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 59–64 (in Russ.).

16. Avdeev V.B., Katrusha A.N. *Raschot koefitsiyenta oslableniya pobochnykh elektromagnitnykh izluchenyi* [Calculation of the coefficient of attenuation of secondary electromagnetic radiation]. *Special Technique*, 2013, no. 2, pp. 18–27 (in Russ.).

17. Kubanov V.P. *Vliyaniye okruzhayushchey sredy na rasprostraneniye radiovoln* [The influence of the environment on the propagation of radio waves]. Samara, PSUTI, 2013. 92 p. (in Russ.).

18. Avdeev V.B., Anischenko A.V. *Sravnitel'naya otsenka metodicheskikh podkhodov k raschotu otosheniya signal/shum v zadachakh kontrolya zashchishchonnosti informatsii ot utechki za schot pobochnykh elektromagnitnykh izluchenyi* [Comparative evaluation of methodological approaches to calculating the signal-to-noise ratio in the tasks of monitoring information security from leakage due to secondary electromagnetic radiation]. *Special Technique*, 2016, no. 1, pp. 54–63 (in Russ.).

19. Smimov V.V., Smolin V.P. *Ustroystva SVCh i anteny: uchebnoye posobiye* [Microwave devices and antennas: study guide]. SPb., Balt. state tech. un-t, 2012, 188 p. (in Russ.).

20. Tikhonov V.I., Mironov M.A. *Markovskie protsessy* [Markov processes. M., Sov. radio, 1977, 488 p. (in Russ.).

21. Silverstov D.S. *Polumarkovskie protsessy s diskretnym mnozhestvom sostoyaniy* [Semi-Markov processes with a discrete set of states]. M., Sov. radio, 1980, 272 p. (in Russ.).

22. Ignatiev V.M. *Seti Petri–Markova* [Petri Markov networks]. Tula, TulGTU, 1994.

23. Buravtsev A.V. *Stratifikirovannyi metod postroyeniya slozhnoy sistemy* [A stratified method for constructing a

complex system]. *Educational resources and technologies*, 2017, no. 3 (20), pp. 23–32 (in Russ.).

24. Avsentev O.S., Avsentev A.O., Rubtsova I.O. *Funktional'nyye modeli protsessov realizatsii ugroz elektronnomu dokumentooborotu* [Functional models of processes for implementing threats to electronic document management]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2019, no. 4, pp. 40–50 (in Russ.).

25. Yazov Y.K. *Osnovy metodologii koli- chestvennoy otsenki effektivnosti zashchity in-formatsii v komp'yuternykh sistemakh* [Fundamentals of the methodology for the quantitative assessment of the effectiveness of the protection of information in computer systems]. Rostov-o/D, Publishing House SKNTs VSh, 2006, 274 p. (in Russ.).

26. Avsentev O.S., Rubtsova I.O., Yazov Y.K. *K voprosu ob otsenke effektivnosti zashchity informatsii v sistemakh elektronnoy dokumentooborota* [On the Evaluation of the Effectiveness Information Protection in Electronic Document Management Systems]. *Cybersecurity Iss.* 2019, no. 1(29), pp. 25–34 (in Russ.).

Oleg S. Avsentev

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Department of Information Security,
Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia
53, Patriotov pr., Voronezh, Russia, 394065
Phone: +7 (473-2) 00-52-44; +7-903-655-55-14
E-mail: osaos@mail.ru

Artem G. Krugov

Leading specialist, Center of Information Technology,
Communications and Information Protection.
Ministry of Internal Affairs of Russia in the Tver Region
1/70, Mira Sq., Tver, Russia, 170100
Phone: +7 (482-2) 32-93-93; +7-920-697-18-68
E-mail: krtemik@gmail.com

Polina A. Shelupanova

Candidate in Economics, Associate Professor,
Chair of Information Systems Security, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-(382-2) 41-39-39
Email: pi6-mne@yandex.ru

УДК 004.724

А.Е. Ефремова, А.В. Парацинец

Протокол маршрутизации RASeR для беспроводных самоорганизующихся сенсорных сетей

Рассматривается одно из перспективных направлений развития беспроводных сетей – это сеть на основе беспилотных летательных аппаратов. Использование самоорганизующихся сетей на основе БПЛА требует решения множества прикладных задач, связанных с качеством обслуживания сети с высокоподвижными узлами. В рамках данной работы представлен сравнительный анализ известных протоколов маршрутизации с протоколом RASeR, в соответствии с заданными критериями оценки.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, протокол маршрутизации, RASeR, БПЛА.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-40-46

Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой множество распределенных приемо-передающих устройств, называемых узлами сенсорной сети, способных самостоятельно организовывать устойчивую сеть [1]. Сенсорные сети являются перспективным инструментом, позволяющим наблюдать за различными явлениями и процессами без непосредственного присутствия человека. Беспроводная связь между узлами устраняет необходимость использования проводов и позволяет размещать сенсоры как в случайном порядке, так и детерминированным образом в пространстве. Также концепция БСС подразумевает, что узлы, входящие в ее состав, должны иметь невысокую стоимость. Вышеперечисленные факторы делают БСС привлекательной технологией для использования в промышленности [2], популярность БСС растет на потребительском рынке, в частности, в сфере «Умный дом» и «Интернет вещей» [3, 4]. Кроме того, внедрение мобильности узлов в БСС является открытой исследовательской задачей [5] и может дать толчок к созданию новых приложений данной технологии.

В связи с этим мировым научным сообществом с недавнего времени исследуется идея использования группы относительно недорогих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для согласованного выполнения миссий. При этом, в случае выхода из строя одного или нескольких узлов, сеть будет продолжать функционировать. Применение самоорганизующейся сети на основе роя БПЛА позволяет за счет передачи данных через другие узлы, расширить территорию покрытия сети, а также с помощью замены дронов с разрядившимися аккумуляторами повысить длительность проведения операции.

Однако использование самоорганизующихся сетей для обеспечения связи между беспилотными летательными аппаратами предполагает множество технических задач [6], к решению которых в последнее время присоединяется все больше научных коллективов. Одной из основных проблем является низкое качество обслуживания [7]. Это связано с тем, что узлы в такой сети высокоподвижны как относительно друг друга, так и относительно земли. Помимо этого, некоторые узлы в сети могут выйти из строя, и вместо

них могут подключиться новые узлы во время выполнения операции. Таким образом, сеть подвержена частому и быстрому изменению топологии и как следствие постоянным изменениям маршрута доставки данных от источника до получателя. Процесс поиска подходящего пути для передачи данных от источника к месту назначения называется маршрутизацией и является задачей сетевого уровня. Адекватность получаемых данных в беспроводной сенсорной сети непосредственно зависит от протокола маршрутизации, который обеспечивает эффективную работу БСС при определенных параметрах, в заданных условиях и в зависимости от измеряемых величин. Основываясь на опыте зарубежных и отечественных исследователей и разработчиков [8–19], выбран наиболее подходящий для данного применения протокол маршрутизации RASeR.

Цели и задачи

Целью работы является сравнительный анализ протокола маршрутизации RASeR (Robust Ad-hoc Sensor Routing) с такими известными протоколами, как MACRO (MAC/Routing protocol), OLSR (Optimized Link-State Routing) и AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), применительно к беспроводной сенсорной сети с мобильными узлами.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие задачи:

- описание принципа работы протокола RASeR;
- формулировка критериев оценки методов маршрутизации сенсорных сетей с подвижными узлами;
- анализ методов маршрутизации сенсорных сетей в соответствии с критериями оценки;
- приведение результатов сравнительного анализа протоколов маршрутизации.

Описание принципа работы протокола RASeR. Управление доступом к среде

Предполагается, что данный протокол будет использоваться в беспроводной сенсорной сети для обеспечения связи группы беспилотных летательных аппаратов. Сеть должна быть развернута с такой мощностью, чтобы узлы по окончании выполнения задачи могли вернуться на базу. Это значит, что ни один из узлов не должен выходить из сети, за исклю-

чением случаев отказа узла, а, следовательно, количество узлов сети остается фиксированным на протяжении выполняемой ими задачи.

RASeR использует технику слепой пересылки в БСС для передачи пакетов приемнику, а также протоколы управления доступом к среде (MAC уровень) с временным разделением каналов (TDMA) для решения проблемы поддержания актуального градиента в изменяющейся топологии без риска возникновения ширококвещательного шторма. Таким образом, каждый узел осуществляет ширококвещательную рассылку в определенном порядке в соответствии с временным интервалом – слотом, длительность которого рассчитана для передачи одного пакета. Порядок временных интервалов для каждого узла фиксирован и циклический. Время, которое требуется для каждого узла, чтобы передать соответствующий пакет, называется циклом. На рис. 1 представлена структура цикла TDMA, который состоит из n слотов S_{n-1} , где n – количество узлов в сети.



Рис. 1. Структура цикла TDMA

Длительность временных интервалов и номера узлов устанавливаются до развертывания сети, что делает протокол RASeR адаптируемым. Также протокол масштабируется с сохранением уровня надежности доставки пакетов, однако увеличение количества узлов приводит к увеличению уровня задержки.

Применение протокола TDMA на уровне MAC позволяет узлам прослушивать остальные узлы в пределах видимости на протяжении длительности слота, что позволит ему рассчитывать свой градиент с высокой степенью точности.

Однако одной из основных проблем протокола TDMA является уровень сквозной задержки, обусловленный тем, что узлам необходимо ждать выделенных временных интервалов для передачи пакетов. Тем не менее значение сквозной задержки остается низким ввиду того, что отсутствует механизм предотвращения столкновений и повторных передач. Кроме того, в случаях, когда требуются небольшие размеры пакетов, длительность цикла будет низкой.

Для использования протокола TDMA необходимо наличие синхронизации между устройствами сети, ряд доступных методов рассмотрен в [21]. Одним из них является метод RBS (Reference broadcast synchronization), который подразумевает, что все узлы будут получать пакет-маяк одновременно по ширококвещательной рассылке, а затем узлы будут синхронизироваться в зависимости от времени прибытия эталонного пакета-маяка. Другим методом может быть использование детерминированного характера протокола TDMA. Поскольку каждый узел знает, когда ожидается запуск каждого слота во время прослушивания ширококвещательной передачи другого узла, он сравнивает время прибытия пакета с началом отсчета ожидаемого запуска. Кроме того, если для получения

информации о местоположении используется система навигации, как, например, ГЛОНАСС, каждый узел может синхронизировать свои часы с полученным временем со спутников.

Нормальный режим работы протокола

Протокол RASeR использует метод слепой пересылки, при этом решение о пересылке данных производится принимающим узлом на основе значения количества переходов до приемного узла. Таким образом, когда узел производит ширококвещательную рассылку, пакет принимается всеми соседями в зоне радиовидимости. Затем каждый соседний узел сравнивает количество переходов, которое известно из принятого пакета, со своим собственным. Затем, если количество переходов узла меньше, чем количество переходов в принятом пакете, пакет должен быть переадресован. Если собственное количество переходов узла больше, чем количество переходов в принятом пакете, пакет удаляется, а если эти величины равны, необходимо учитывать приоритет пакетов.

Приоритеты используются для управления количеством маршрутов, тем самым чрезмерное избыточное дублирование пакетов в сети сводится к минимуму и в то же время повышается надежность протокола из-за разнообразия маршрутов. Каждый пакет имеет бит приоритета, его отсутствие обозначает, что этот пакет является пакетом ветвления. Когда узел получает пакет, он сохраняет его в очереди, поэтому перед наступлением соответствующего слота узел должен решить, какой пакет передать и при этом пакеты с высоким приоритетом имеют преимущество перед пакетами ветвления.

Общий алгоритм работы в каждом временном интервале для узлов сети, построенной на основе протокола маршрутизации RASeR, показан на рис. 2 в виде блок-схемы.

На первом этапе в начале нового временного интервала узлу необходимо определить, является ли данный слот выделенным для него в цикле TDMA. Это делается путем сравнения идентификатора узла с номером временного интервала. Если они не равны, то узел будет прослушивать передачу соседних узлов.

Если узел услышит передачу, тогда он сначала обновит свое значение количества переходов до базовой станции, если это необходимо, а затем, при наличии данных, сохранит их в очереди. Иначе если соседние узлы не осуществляют ширококвещательную рассылку, тогда узел переходит в «спящий режим» в течение оставшейся части временного интервала. В случае, когда идентификатор узла совпадает с номером временного интервала, узел проверяет, есть ли у него данные для передачи. Если есть, то пакет передается в порядке метода организации очереди FIFO («первым пришел – первым ушел») и отправляется с битом приоритета.

В случае, когда узел не имеет данных для пересылки, отправляется пакет-маяк – это первые два поля пакета данных, в составе которого идентификатор узла и количество переходов до базовой станции, и алгоритм повторяется.

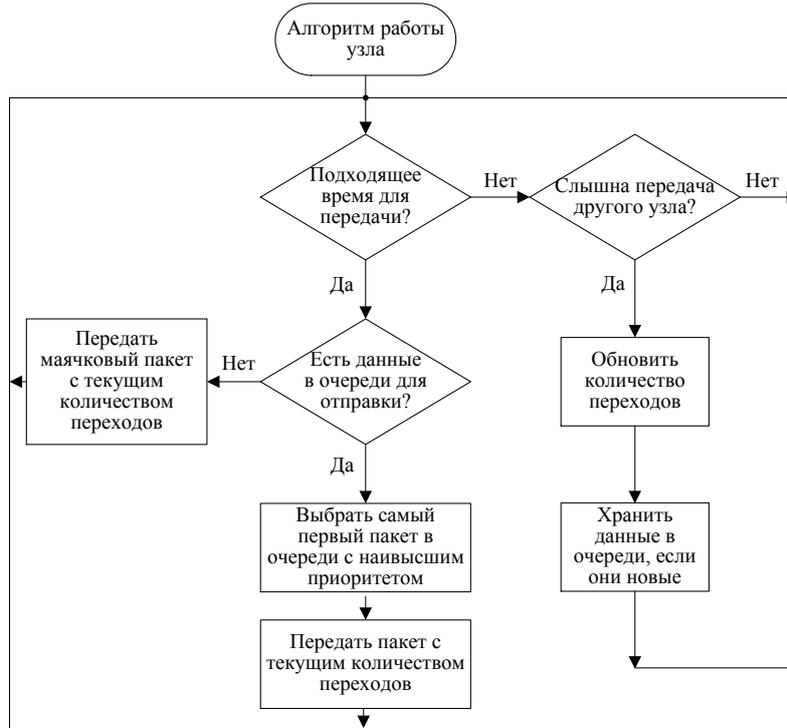


Рис. 2. Алгоритм работы узла протокола RASeR

Ключевыми характеристиками протокола RASeR, которые делают его надежным, является то, что каждый узел может выступать маршрутизатором, осуществляющим ветвление маршрута передачи пакета. Из этого следует, что возможна реализация одновременно нескольких направлений до базовой станции, что значительно снижает потерю пакетов при частых изменениях топологии сети. Кроме того, поскольку каждый узел ведет себя одинаково, это позволяет поддерживать протокол простым и может позволить организовать сеть с большим количеством узлов.

Критерии оценки протокола маршрутизации.

Анализ методов маршрутизации сенсорных сетей

Ввиду аппаратных ограничений приемопередающих узлов по мощности, протоколы должны иметь низкую вычислительную сложность и низкое энергопотребление, поскольку иначе снижается производительность сети и может значительно сократиться срок службы сети.

Таким образом, можно выделить критерии, которые позволят оценить протокол маршрутизации:

- доля успешно полученных пакетов из всех созданных пакетов является одним из ключевых показателей в любой схеме маршрутизации, поскольку отражает качество протокола;
- затрачиваемое время на передачу между узлом, который генерирует данные, и принимающим узлом/ шлюзом;
- пропускная способность, которая характеризуется объемом передаваемой информации в единицу времени;
- непроизводительные издержки, которые включают в себя как объем служебной информации, так и долю потерянных пакетов при передаче;
- энергопотребление.

Для оценки производительности протокола RASeR далее представлены сравнительные характеристики с другими протоколами в соответствии с заданными критериями при разных скоростях передвижения узлов, масштабируемости, а также при различных нагрузках трафика сети. Характеристики протокола маршрутизации RASeR получены в результате моделирования в программной среде MATLAB [21]. Исходные данные, которые использовались при моделировании, представлены в табл. 1. Данные протоколов AODV, OLSR, MACRO были получены в [22] путем моделирования в программной среде OPNET Modeler [23]. Протокол маршрутизации AODV – это реактивный протокол, который наиболее часто используется в сенсорных сетях. Протокол OLSR является проактивным и приведен для полноты сравнения. MACRO-протокол – это один из новых протоколов маршрутизации, который направлен на использование в сенсорных сетях с подвижными узлами.

Результаты сравнительных характеристик протоколов в табл. 2 продемонстрировали, что протокол RASeR имеет превосходство над остальными в случае изменения скорости передвижения узлов сети. Однако уровень среднего потребления энергии данного протокола незначительно уступает протоколу MACRO.

В табл. 3 следует обратить внимание на такие характеристики, как средние непроизводительные издержки и среднее потребление энергии. По мере увеличения количества узлов протокол RASeR становится более энергоэффективным, что связано с тем, что время слота одинаково для каждого сценария. Это объясняется тем, что количество слотов за один период времени остается неизменным, позволяя осуществлять только фиксированное количество передач.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования		
Количество узлов в сети	n	25
Длина одной стороны квадратной области сети, м	L	600
Радиус покрытия узлов, м	r	200
Скорость передачи, бит, кбит/с	R_b	250
Максимальная скорость передвижения узлов, м/с	V_{max}	25
Скорость генерации пакета, пакет/с	f_p	1
Размер генерируемых данных, бит	L_{data}	32
Общий размер пакета, бит	L_p	47
Напряжение питания, В	V_{batt}	3
Потребляемый ток при передаче данных, мА	I_x	16,5
Потребляемый ток при приеме данных, мА	I_{rx}	15,5

Таблица 2

Мобильность					
	Скорость передвижения узлов, м/с	MACRO	OLSR	AODV	RASeR
Коэффициент доставки пакетов (PDR)	3	1	0,46	0,74	1
	10	0,99	0,5	0,77	0,99
	20	0,98	0,51	0,74	0,98
	40	0,97	0,53	0,73	0,98
Средняя сквозная задержка (D_{av}), с	3	0,05	0,138	1,2	0,01
	10	0,065	0,131	1,18	0,01
	20	0,075	0,125	1,21	0,01
	40	0,06	0,121	1,23	0,01
Средние непроизводительные издержки (ОН), бит	3	112	480	640	77
	10	119	460	505	77,6
	20	120	464	479	77,8
	40	123	465	466	78
Пропускная способность (TP), бит/с	3	641	300	499	718
	10	640	349	511	718,4
	20	639	358	510	718,2
	40	639	359	506	717
Среднее потребление энергии (EC), Дж/с	3	0,0017	0,0146	0,0163	0,0036
	10	0,0018	0,0149	0,0174	0,0036
	20	0,0019	0,0142	0,0178	0,0037
	40	0,0021	0,0141	0,0176	0,0037

Таблица 3

Масштабируемость						
	Количество узлов	Длина стороны, м	MACRO	OLSR	AODV	RASeR
Коэффициент доставки пакетов (PDR)	15	400	1	0,81	0,88	1
	50	1000	0,95	0,34	0,63	0,998
	100	1500	0,77	0,16	0,38	0,97
Средняя сквозная задержка (D_{av}), с	15	400	0,01	0,07	4,8	0,01
	50	1000	0,69	0,2	5,13	0,03
	100	1500	1,46	0,24	5,15	0,12
Средние непроизводительные издержки (ОН), бит	15	400	5	252	256	104
	50	1000	142	1211	509	49
	100	1500	245	2498	1162	41
Пропускная способность (TP), бит/с	15	400	384	351	397	418
	50	1000	1408	363	755	1413
	100	1500	2161	372	952	2784
Среднее потребление энергии (EC), Дж/с	15	400	0,001	0,0072	0,0125	0,0045
	50	1000	0,0051	0,0169	0,0199	0,0028
	100	1500	0,0074	0,0178	0,016	0,0021

При этом если узлов много, все равно существует лишь ограниченное количество временных интервалов, в пределах которых происходит передача данных. Таким образом, увеличение количества узлов приводит к снижению потребления энергии.

Результирующие значения средних непроизводительных издержек протокола RASeR в табл. 4 уменьшаются по мере увеличения скорости генерации пакетов, что связано с увеличением объема передаваемых данных. Также при низком уровне трафика

значения непроизводительных издержек сравнительно велики. Однако, когда скорость генерации данных возрастает, значение непроизводительных издержек пропорционально уменьшается.

Так происходит потому, что при увеличении трафика объем успешно переданных данных больше, чем количество генерируемых непроизводительных издержек.

Таблица 4

Уровень трафика					
	Скорость генерации данных, пк/с	MACRO	OLSR	AODV	RASeR
Коэффициент доставки пакетов (PDR)	1	1	0,52	0,74	1
	4	0,99	0,43	0,6	0,998
	8	0,7	0,32	0,46	0,997
	10	0,51	0,27	0,39	0,995
Средняя сквозная задержка (D_{av}), с	1	0,07	0,14	12,2	0,01
	4	0,16	0,26	14,7	0,01
	8	3,8	1,63	17,4	0,015
	10	5,02	2,53	18,88	0,016
Средние непроизводительные задержки (ОН), бит	1	7	501	498	9
	4	46	298	195	26
	8	92	209	126	87
	10	103	201	119	98
Пропускная способность (TP), бит/с	1	794	97	453	802
	4	2685	1023	1205	3098
	8	3292	1431	1997	6296
	10	3298	1469	2031	7991
Среднее потребление энергии (EC), Дж/с	1	0,001	0,0147	0,0171	0,0042
	4	0,0048	0,0256	0,0238	0,0064
	8	0,0079	0,0284	0,0286	0,0091
	10	0,0088	0,029	0,0291	0,014

Таким образом, по совокупности сравнительных данных можно сделать вывод, что протокол RASeR способен адаптироваться к масштабированию сети, высокому уровню трафика, мобильности узлов сети и может применяться в сетях на основе БПЛА.

Заключение

В настоящей работе рассматривается сеть на основе беспилотных летательных аппаратов, для которой характерна такая особенность, как постоянное изменение местоположения каждого узла. В результате сравнительного анализа протоколов маршрутизации выбран наиболее подходящий для данного применения протокол RASeR. Использование протокола RASeR циклического характера управлением доступа к среде исключает широкоэвентуальный шторм, а также, несмотря на отсутствие механизма предотвращения столкновений и повторных передач, сохраняет надежность доставки пакетов даже при высокой частоте изменения топологии. В случае выхода из строя какого-либо из узлов сети существует возможность его замены работоспособным узлом с таким же идентификационным номером, что не повлияет на качество обслуживания сети.

Литература

1. Киричек Р.В. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей / Р.В. Киричек, А.И. Парамонов, А.В. Прокопьев, А.Е. Кучерявый [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf>, свободный (дата обращения: 26.12.2019).
2. The Dynamic Demands of IoT in a Connected World [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.adventone.com/wp-content/files_mf/1464326780_WhitepaperThe

DynamicDemandsOfIoTinaConnectedWorld.pdf, свободный (дата обращения: 05.04.2018).

3. That «Internet of Things» Thing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986>, свободный (дата обращения: 13.01.2020).
4. Интернет вещей / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешков, М.Ю. Самсонов. – Самара: Изд-во Ас Гард, 2014. – 342 с.
5. Conti M. Mobile Ad Hoc networking: milestones, challenges and new research directions / M. Conti, S. Giordano // IEEE Commun. Mag. – 2014. – № 52 (1). – P. 85–96.
6. Шамонов М.Ю., Абилов А.В. Мобильные самоорганизующиеся сети беспилотных летательных аппаратов Flying Ad Hoc Networks (FANETS) / М.Ю. Шамонов, А.В. Абилов // Приборостроение в XXI веке. – 2016. Интеграция науки, образования и производства: сб. матер. XII Междунар. науч.-техн. конф. – 2017. – С. 542–550.
7. Дорохова А.А. Исследование трафика и качества обслуживания в самоорганизующихся сетях на базе БПЛА / А.А. Дорохова, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Т. 4, № 2. – С. 12–25.
8. Clausen T. Optimized Link State Routing Protocol / T. Clausen, P. Jacquet, C. Adjih, A. Laouiti, P. Minet, P. Muhlethaler, A. Qayyum, L. Viennot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://datatracker.ietf.org/doc/rfc3626/?include_text=1, свободный (дата обращения: 26.12.2019).
9. Perkins C. Ad-hoc on-demand distance vector routing / C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das // Proc. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99). – 1999. – P. 90–100.
10. Heinzelman W. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks / W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan // Proc. 33rd Hawaii Int. Conf. System Sciences (HICSS 00). – 2000. – P. 8020.

11. Kumar G. Routing protocol enhancement for handling node mobility in wireless sensor networks / G. Kumar, M. Vinu, P. Athithan // Proc. IEEE Region 10 Conf. (TENCON). – 2008. – P. 1–6.

12. Directed diffusion for wireless sensor networking / C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, F. Silva // IEEE ACM Trans. Netw. – 2003. – № 11 (1). – P. 2–16.

13. Cakici S. A novel cross-layer routing protocol for increasing packet transfer reliability in mobile sensor networks / S. Cakici, I. Erturk, S. Atmaca, A. Karahan // Wirel. Pers. Commun. J. – 2014. – № 77 (3). – P. 2235–2254.

14. Shurgers C. Energy efficient routing in wireless sensor networks / C. Shurgers, M. Srivastava // IEEE military Communications Conf. (MILCOM'01). – 2001. – P. 357–361.

15. Hayes T. Proactive highly ambulatory sensor routing (PHASeR) protocol for mobile wireless sensor networks / T. Hayes, F. Ali // Pervasive Mob. Comput. – 2015. – Vol. 21. – P. 47–61.

16. Кайсина И.А. Анализ эффективности протоколов маршрутизации OLSR и AODV в летающей сети FANET / И.А. Кайсина, Д.С. Васильев, А.В. Абилов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова (Ижевск). – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 87–90.

17. Зацепин Э.С. Обзор характеристик протоколов маршрутизации в mesh-сетях // Международный журнал экспериментального образования. – Пенза: ИД «Академия естествознания», 2013. – № 10-2. – С. 342–345.

18. Метелёв А.П. Протоколы маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях / А.П. Метелёв, А.В. Чистяков, А.Н. Жолобов // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород). – 2013. – № 3–1. – С. 75–78.

19. Павлов А.А. Протоколы маршрутизации в беспроводных сетях / А.А. Павлов, И.О. Датъев // Труды Кольского научного центра РАН (Апатиты: Кольский научный центр РАН). – 2014. – № 5 (24). – С. 64–75.

20. Sivrikaya F. Time synchronization in sensor networks: a survey / F. Sivrikaya, B. Yener // IEEE Network. – 2014. – Vol. 18, No. 4. – P. 45–50.

21. MATLAB Analyze data, develop algorithms, and create mathematical model [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/>, свободный (дата обращения: 05.04.2018).

22. Hayes T., Ali F.H. Robust Ad-hoc Sensor Routing (RASeR) protocol for mobile wireless sensor networks // Ad Hoc Networks. – 2016. – P. 128–144.

23. OPNET is now part of Riverbed [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/opnet.html?redirect=opnet?redirect=opnet>, свободный (дата обращения: 05.04.2018).

Ефремова Алёна Евгеньевна

Разработчик ООО «САПЛ-БИЗ»

Нахимова пер., д. 12/1, г. Томск, Россия, 634012

Тел.: +7-923-403-62-68

Эл. почта: alena.e.efremova@gmail.com

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: alexandrparashchinec@gmail.com

Efremova A.E., Parashchinec A.V.

Routing protocol RASeR for wireless self-organizing sensor network

This article is considering one of the promising directions of wireless sensory networks development - a network based on unmanned aerial vehicles. Use of self-organizing networks on the basis of UAVs requires solving a set of the applied problems connected with quality of service of a network with high-speed knots. This paper presents a comparative analysis of known routing protocols with the RASeR protocol, in accordance with given evaluation criteria.

Keywords: wireless sensor networks, routing protocol, RASeR, UAV.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-40-46

References

1. Kirichek R.V., Paramonov A.I., Prokop'ev A.V., Kucheryavyi A.E. [The investigation evolution in the wireless sensor networks area]. *Telecom IT Electronic Scientific Journal*, 2014, vol. 8, no. 4 (in Russ.). Available at: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf> (Accessed: December 26, 2019).

2. The Dynamic Demands of IoT in a Connected World. ADVENT ONE Publ. Available at: https://www.adventure.com/wp-content/files_mf/1464326780WhitepaperTheDynamicDemandsfloTinaConnectedWorld.pdf (Accessed: April 5, 2018).

3. That «Internet of Things» Thing. RFID JOURNAL Publ. Available at: <http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986> (Accessed: April 5, 2018).

4. Roslyakov A.V., Vanyashin S.V., Grebeshkov A.Yu., Samsonov M.Yu. *Internet Veshchei: monografiya* [Internet of Things: a monograph]. Samara, Izdatel'stvo As Gard Publ., 2014, 342 p. (in Russ.).

5. Conti M., Giordano S. Mobile Ad Hoc networking: milestones, challenges and new research directions. *IEEE Commun. Mag.* 2014, vol. 52, no. 1, pp. 85–96.

6. Shamonov M.Yu., Abilov A.V. [Mobile self-organizing networks of unmanned aerial vehicles Flying Ad Hoc Networks (FANETS)]. *Instrument making in the XXI century - 2016. Integration of science, education and production. Collection of materials 22nd International Sci. and Technical Conf.* 2017, pp. 542–550 (in Russ.).

7. Dorokhova A., Paramonov A. *Issledovanie trafika i kachestva obsluzhivaniya v samoorganizuyushchikhsya setyakh na baze BPLA* [Traffic and Quality of Service Research in a Flying Ad-Hoc Network]. *Telecom IT Publ.*, St. Petersburg, 2016, vol. 4, iss. 2, pp. 12–25 (in Russ.).

8. Clausen T., Jacquet P., Adjih C., Laouiti A., Minet P., Muhlethaler P., Qayyum A., Viennot L. Optimized Link State Routing Protocol, 2003. Available at: https://datatracker.ietf.org/doc/rfc3626/?include_text=1 (Accessed: December 26, 2019).

9. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad-hoc on-demand distance vector routing, Proc. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99), 1999, pp. 90–100.

10. Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks, Proc. 33rd Hawaii Int. Conf. System Sciences (HICSS 00), 2000, 8020 p.

11. Kumar G., Vinu M., Athithan P. Routing protocol enhancement for handling node mobility in wireless sensor networks, Proc. IEEE Region 10 Conf. (TENCON), 2008, pp. 1–6.

12. Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D., Heidemann J., Silva F. Directed diffusion for wireless sensor networking, *IEEE ACM Trans. Netw.* 2003, vol. 11, iss. 1, pp. 2–16.

13. Cakici S., Erturk I., Atmaca S., Karahan A. A novel cross-layer routing protocol for increasing packet transfer reliability in mobile sensor networks, *Wirel. Pers. Commun. J.*, 2014, vol. 77, iss. 3, pp. 2235–2254.
14. Shurgers C., Srivastava M. Energy efficient routing in wireless sensor networks, *IEEE military Communications Conf. (MILCOM'01)*, 2001, pp. 357–361.
15. Hayes T., Ali F. Proactive highly ambulatory sensor routing (PHASeR) protocol for mobile wireless sensor networks, *Pervasive Mob. Comput.*, 2015 vol. 21, pp. 47–61.
16. Kaysina I.A., Vasiliev D.S., Abilov A.V. [Analysis of Efficiency for AODV and OLSR Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks]. *Kalashnikov ISTU*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 87–90 (in Russ.).
17. Zatsepin E.S. [Characteristics of protocols in mesh-networks]. *Voronezh Institute of High Technologies*, 2013, no. 10–2, pp. 342–345 (in Russ.).
18. Metelyov A.P., Chistyakov A.V., Zholobov A.N. [Routing protocols in wireless Ad hoc networks]. *Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*, 2013, no. 3–1, pp. 75–78 (in Russ.).
19. Pavlov A.A., Datyev I.O. [Routing protocols in wireless networks]. *Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, no. 5 (24), pp. 64–75 (in Russ.).
20. Sivrikaya F., Yener B. Time synchronization in sensor networks: a survey, *IEEE Network*, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 45–50.
21. MATLAB Analyze data, develop algorithms, and create mathematical model, available at: www.mathworks.com, 2018.
22. Hayes T., Ali F.H. Robust Ad-hoc Sensor Routing (RAsER) protocol for mobile wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2016, pp. 128–144.
23. OPNET is now part of Riverbed. Available at: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/opnet.html?redirect=opnet?redirect=opnet> (Accessed: April 5, 2018).

Alena E. Efremova

Backend Developer, LLC «SUPL-BIZ»
12/1, Nakhimova per., Tomsk, Russia, 634012
Phone: +7-923-403-62-68
Email: alena.e.efremova@gmail.com

Alexander V. Parashchinec

Post-graduate student, Department of Automated Control Systems, 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

УДК 519.767.6

Е.И. Грибков, Ю.П. Ехлаков

Нейросетевая модель на основе системы переходов для извлечения составных объектов и их атрибутов из текстов на естественном языке

Извлечение структурированной информации из текстов отзывов и обращений пользователей представляет собой задачу с большой научной и коммерческой ценностью. Однако современные методы извлечения информации из текстов либо не учитывают структурные взаимосвязи в извлекаемых знаниях, либо имеют низкую точность их извлечения. В работе предлагается нейросетевая модель на основе системы переходов для извлечения составных объектов и их атрибутов. Модель использует принцип многозадачного обучения, при котором в рамках одной модели происходит извлечение составных частей объектов и определение связей между ними. Качество работы предложенной модели проверено на задачах обработки отзывов из магазинов Amazon и Ali-Express и обработки запросов пользователей программных продуктов из магазина Google Play. Результаты экспериментов демонстрируют рост качества извлечения связей между фрагментами на величину от 0,07 до 0,172 F1 в зависимости от задачи.

Ключевые слова: обработка естественного языка, машинное обучение, нейронные сети, анализ тональности.
doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-47-52

Конкурентоспособность продуктов (товаров) зависит от способности и гибкости бизнеса реагировать на просьбы потребителей, а также времени реакции на эти просьбы. В моделях жизненного цикла продукта эти вопросы рассматриваются на этапах эксплуатации и сопровождения. Одним из направлений, способствующих эффективному реагированию бизнеса на качество решения этих задач, является использование методов анализа тональности для извлечения и анализа вопросов, мнений и пожеланий из текстов пользователей о качестве и потребительских свойствах продуктов, выявленных в процессе их эксплуатации и сопровождения. Наиболее перспективными направлениями решения задач в области анализа тональности являются методы машинного обучения.

Большинство существующих подходов оценивает тональность всего текста целиком, что затрудняет анализ отдельных аспектов и не позволяет получить детальной картины. Работы по аспектно-ориентированному и целевому анализу тональности призваны устранить данный недостаток, позволяя оценивать тональность заранее определенных категорий аспектов или терминов в контексте отзыва. Кроме того, в рамках аспектно-ориентированного анализа тональности ставится задача извлечения из текста аспектных терминов, которые являются объектами оценочных суждений потребителей. Авторы [1] предлагают помимо аспектных терминов извлекать также выражения, в которых пользователи высказывают свои мнения об аспектных терминах, а также связи между ними, ставя, таким образом, задачу предсказания составных объектов.

В данной работе в развитие идеи о предсказании составных объектов рассматривается нейросетевая модель на основе системы переходов для извлечения составных объектов и их атрибутов из текстов на естественном языке.

Обзор существующих подходов

Для целенаправленного анализа тональности в тексте авторы [2] предлагают специализированную модель на основе рекуррентной нейронной сети, которая превосходит аналоги по доле правильных ответов в тестовой выборке и составляет 0,715. Для решения задачи аспектно-ориентированного анализа тональности в [3] рассматривается модель на основе свёрточных нейронных сетей. Авторы используют набор данных дорожки SemEval 2015 Task 12, в котором необходимо извлекать аспекты и описания из текстов отзывов, определять тональность аспектов, документов и определять тематику документа. Предложенная модель обучает предсказание всех сущностей одновременно, что позволяет ей продемонстрировать лучший показатель точности 0,592 F1.

В [1] предложена модель машинного обучения на основе комбинации свёрточной и рекуррентной нейронной сети для извлечения фрагментов аспектов, описаний, определения тональности описаний, а также поиска связей между аспектами и их описаниями. Точность модели на англоязычном корпусе отзывов из интернет-магазина Amazon составляет 0,67 F1 при извлечении аспектов, 0,50 F1 при извлечении описаний и 0,81 F1 при определении связей между ними.

Недостатком данной работы можно считать способ, которым авторы измеряют точность определения связей: в приведённых результатах предполагается, что компонент для поиска связей будет получать на вход безошибочно обнаруженные аспекты и описания. Однако при использовании модели в реальных условиях точность этого компонента будет ограничена качеством извлечения фрагментов. Авторы [4] в результатах отмечают ухудшение в определении качества извлечении связей на величину порядка 0,3 F1.

Проведённый анализ показал, что существующие методы анализа тональности текстов на есте-

ственном языке не позволяют извлекать структурные взаимосвязи между элементами текста с точностью, достаточной для решения практических задач. Для разрешения данной проблемы авторы полагают использовать нейросетевые модели на основе систем переходов (transition-based). Этот тип моделей широко применяется при решении различных задач предсказания объектов со сложной структурой: определения фразовой структуры предложения [5], предсказания синтаксических деревьев зависимостей [6] и извлечения именованных сущностей [7]. Среди основных преимуществ моделей в этих работах отмечаются простота алгоритмов обучения и вывода, высокая скорость работы, а также возможность использовать сложные нелокальные признаки.

Постановка задачи

Составным объектом в тексте, представленном в виде последовательности слов $\mathbf{w} = w_1, \dots, w_N$, будем понимать пару, состоящую из множества фрагментов I и множества связей между фрагментами R . Каждый элемент множества I определяет некоторую часть составного объекта, заданного непрерывной последовательностью слов в тексте (фрагментом). Каждый из фрагментов в зависимости от конкретной предметной специфики обладает определенной семантической ролью или типом, обозначаемыми меткой из множества $Labels$. Таким образом, фрагмент задается кортежем $(w_j, w_{j+1}, \dots, label)$, где j – индекс первого слова, $label \in Labels$. Элементы множества отношений между фрагментами R задают структуру объекта в виде направленных связей, объединяющих пары фрагментов (i_k, i_j) и имеющих атрибуты из множества допустимых пар «атрибут–значение»: $AV = \{(a_1, v_1), (a_1, v_2), (a_2, v_3), \dots\}$. Таким образом, каждый элемент $r \in R$ можно определить в виде кортежа $r = (i_k, i_j, \{(a_1, v_1), (a_2, v_3)\})$. Пример составного объекта в общем виде приведен на рис. 1.

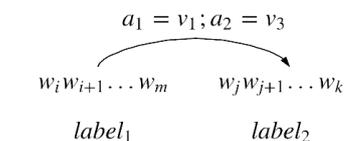


Рис. 1. Пример структуры составного объекта в общем случае

Имея набор обучающих данных $D = \{\{\mathbf{w}^d, \{rd\}\}$, необходимо получить модель для извлечения составных объектов из произвольных текстов.

Нейросетевая модель на основе системы переходов

Извлечение составных объектов предлагается осуществлять с использованием нейросетевой модели на основе системы переходов, заданной кортежем $(C_t, Y, A(C_t))$, где C_t – конфигурация системы, Y – множество переходов, изменяющих конфигурацию, $A(C_t)$ – функция, задающая множество переходов, доступных для исполнения в текущей конфигурации. Конфигурация C_t содержит промежуточную информацию о предсказываемом объекте на шаге t . На каждом шаге работы на основании содержания C_t

модель выбирает некоторый переход из множества Y , исполнение которого вносит изменения в структуры данных в C_t . В данной работе выбор очередного перехода осуществляется с помощью вероятностной модели следующим образом:

$$\hat{y}_t = \arg \max_{y \in Y} P(y | C_t). \quad (1)$$

В зависимости от конкретной формы C и Y в некоторых конфигурациях выполнение определенных переходов может быть запрещено. Такого рода ограничения на возможные переходы задаются с помощью функции $A(C_t): C_t \mapsto Y' \subseteq Y$. Выделяют также две специальные конфигурации: начальную C_0 , которая содержит исходные данные, необходимые для предсказания; конечную C_T , при достижении которой процесс предсказания прекращается.

В данной работе для решения задачи извлечения составных объектов из текстов предлагается определить конфигурацию в виде кортежа (B, S, L, H) . Список B содержит в себе все необработанные на данный момент слова исходного текста. Стек S содержит фрагменты в порядке их извлечения из текста. В ходе предсказания сущности из нескольких слов формируются инкрементально, поэтому во фрагмент на вершине стека допускается добавлять новые слова. Список L содержит связи между обнаруженными фрагментами. Список H хранит историю совершенных переходов, которая привела к текущей конфигурации C_t .

Множество доступных переходов задано в виде набора $Y = \{Shift, Start(label), Add(label), Link(n_1, n_2), Attribute(a, v), End\}$. *Shift* отбрасывает из B первый элемент. *Start(e)* создает новую сущность типа e , помещает её на вершину стека S и перемещает слово из начала списка B в созданную сущность. *Add* перемещает элемент из начала списка B в сущность, находящуюся на вершине стека S . *Link(n_1, n_2)* связывает элементы стека S на позициях n_1 и n_2 , образованная связь помещается в конец списка L . Такой способ задания множества Y ограничивает максимальную глубину, на которой можно образовать связь между элементами S . *Attribute(a, v)* присваивает атрибуту a значение v в связи, находящейся в конце L . Переход *End* заканчивает процесс предсказания. Таким образом, множество $\mathbf{R} = \{r^d\}$ для каждого обучающего примера будет преобразовано в последовательность переходов $\mathbf{y} = y_1, \dots, y_T$.

Условия допустимости совершения переходов, определяющие функцию $A(C_t)$, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Предусловия выполнения переходов	
Переход	Предусловие
<i>Shift</i>	$B \neq \emptyset$
<i>Start(label)</i>	$B \neq \emptyset$
<i>Add(label)</i>	$B \neq \emptyset \wedge S \neq \emptyset \wedge type(S_1) = label$
<i>Link(n_1, n_2)</i>	$\exists S_{n_1} \wedge \exists S_{n_2} \wedge (n_1, n_2) \notin L$
<i>Attribute(a, v)</i>	$L \neq \emptyset \wedge \forall v - \exists (a, v) \in L_{-1}$
<i>End</i>	$B = \emptyset$

На рис. 2 приведен пример абстрактного автомата для случая извлечения двух типов сущностей – e_1 и e_2 . Условное распределение вероятности по возможным переходам из выражения (1) задается классификатором следующего вида:

$$P(y | C_t) = \text{softmax}_{y \in A(C_t)} (\mathbf{W} \cdot \boldsymbol{\varphi}(C_t) + \mathbf{b}), \quad (2)$$

где \mathbf{W} , \mathbf{b} – параметры классификатора; $\boldsymbol{\varphi}(C_t)$ – вектор признаков, описывающий текущую конфигурацию.

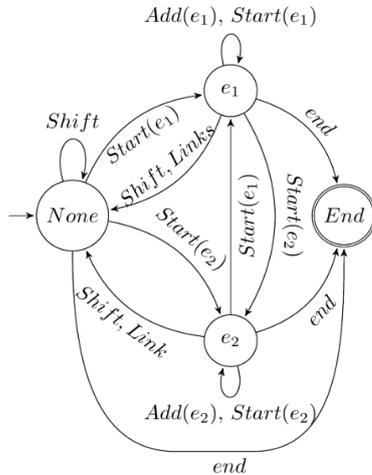


Рис. 2. Пример абстрактного автомата для извлечения сущностей

Вектор признаков $\boldsymbol{\varphi}(C_t)$ формируется путем конкатенации векторов описаний отдельных элементов конфигурации

$$\boldsymbol{\varphi}(C_t) = [\boldsymbol{\varphi}(B); \boldsymbol{\varphi}(S); \boldsymbol{\varphi}(H)], \quad (3)$$

где $[\mathbf{v}_1; \mathbf{v}_2; \dots; \mathbf{v}_n]$ обозначает конкатенацию набора из n векторов в один вектор. В формулах нет этих обозн. – формулы 9, 10, 11.

Основой для формирования признаков элементов конфигурации служат контекстные векторные представления для исходного текста, образуемые с помощью функции \mathbf{F} :

$$\boldsymbol{\varphi}(B_1), \dots, \boldsymbol{\varphi}(B_n) = \mathbf{F}(E(w_1), \dots, E(w_N)), \quad (4)$$

где E – функция, отображающая слова в векторные представления. В качестве F можно использовать любые функции, позволяющие отображать одну последовательность векторов в другую. В статье рассматриваются рекуррентные сети типа Long Short-Term Memory (LSTM) [8].

При использовании рекуррентных нейронных сетей (РНС) контекстные представления элементов последовательности образуются с помощью рекуррентных взаимосвязей следующего вида:

$$\mathbf{h}_n = \sigma(\mathbf{U}\mathbf{E}(w_n) + \mathbf{W}\mathbf{h}_{n-1} + \mathbf{b}), \quad (5)$$

где \mathbf{U} , \mathbf{W} – матрицы рекуррентного взаимодействия, \mathbf{b} – вектор смещений.

В этом случае контекстная информация передается таким образом, что элемент n несет информацию обо всех предыдущих ($n - 1$). Учитывать последующий контекст можно, применив двунаправленные РНС [9], в которых итоговые контекстные векторы образуются путем объединения векторов \mathbf{h}_n и \mathbf{h}_n , полученных при прямом (слева направо) и обратном (справа налево) переходах:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_n &= \sigma(\mathbf{U}\mathbf{E}(w_n) + \mathbf{W}\mathbf{h}_{n-1} + \mathbf{b}), \\ \mathbf{h}_n &= \sigma(\mathbf{U}\mathbf{E}(w_n) + \mathbf{W}\mathbf{h}_{n+1} + \mathbf{b}), \\ \mathbf{h}_n &= [\mathbf{h}_n; \mathbf{h}_n]. \end{aligned} \quad (6)$$

Наиболее распространенным видом РНС является LSTM, показывающий высокую точность при решении многих задач обработки естественного языка. В нашей работе предлагается использовать двунаправленную LSTM-сеть (BiLSTM) с несколькими слоями.

Вектор $\boldsymbol{\varphi}(B)$ образован конкатенацией признаков первых трех элементов списка B : $\boldsymbol{\varphi}(B) = [\boldsymbol{\varphi}(B_1); \boldsymbol{\varphi}(B_2); \boldsymbol{\varphi}(B_3)]$. Для вектора $\boldsymbol{\varphi}(S)$ сначала рассчитываются признаки для первых 5 элементов S по следующей формуле:

$$\boldsymbol{\varphi}(S_i) = \left[\frac{1}{e(i) - b(i)} \sum_{j=e(i)}^{b(i)} \boldsymbol{\varphi}(B_j); \mathbf{E}(\text{type}(i)) \right], \quad (7)$$

где $b(i)$ и $e(i)$ – начальный и конечный индексы фрагмента текста для i -й сущности ИФ, $\mathbf{E}(\text{type}(i))$ – векторное представление типа фрагмента.

Затем полученные признаки конкатенируются, образуя вектор для $\boldsymbol{\varphi}(S)$:

$$\boldsymbol{\varphi}(S) = [\boldsymbol{\varphi}(S_1); \dots; \boldsymbol{\varphi}(S_5)]. \quad (8)$$

Для задания признаков истории переходов H в момент времени t используется скрытое состояние последнего шага сети LSTM:

$$\boldsymbol{\varphi}(H) = \text{LSTM}(\mathbf{E}(H_1), \dots, \mathbf{E}(H_t))_t. \quad (9)$$

С учетом вышеизложенного архитектура нейросетевой модели может быть представлена в виде диаграммы, представленной на рис. 3.

В отличие от модели [1], предложенная модель позволяет использовать общие признаки как для извлечения фрагментов, так и определения связей между ними. Это уменьшает общее количество параметров в модели, а также приводит к эффекту многозадачного обучения (multitask learning), когда улучшение при решении одной задачи увеличивает качество решения другой связанной задачи.

Обучение модели осуществляется путем максимизации правдоподобия предсказанных последовательностей переходов в сравнении с истинными последовательностями из обучающей выборки. Функцией ошибки служит перекрестная энтропия между предсказанным распределением по возможным и истинным действиям:

$$L(\hat{\mathbf{y}}, \mathbf{y}) = \sum_t \left(- \sum_{i \in Y} \log(P(\hat{\mathbf{y}}_t | C_t))_i (\mathbf{y}_t)_i \right). \quad (10)$$

Для оптимизации множества параметров модели θ , включающего параметры классификатора, сетей BiLSTM и LSTM и векторных представлений $\mathbf{E}(H)$ и $\mathbf{E}(\text{type}(i))$, может использоваться любой алгоритм градиентной оптимизации.

Применение описанной модели для решения конкретных прикладных задач требует задания множества допустимых типов фрагментов $Labels$, множества атрибутов AV и функции ограничений на возможные переходы $A(C_t)$ в соответствии со структурой объектов, которые необходимо извлекать в задаче.

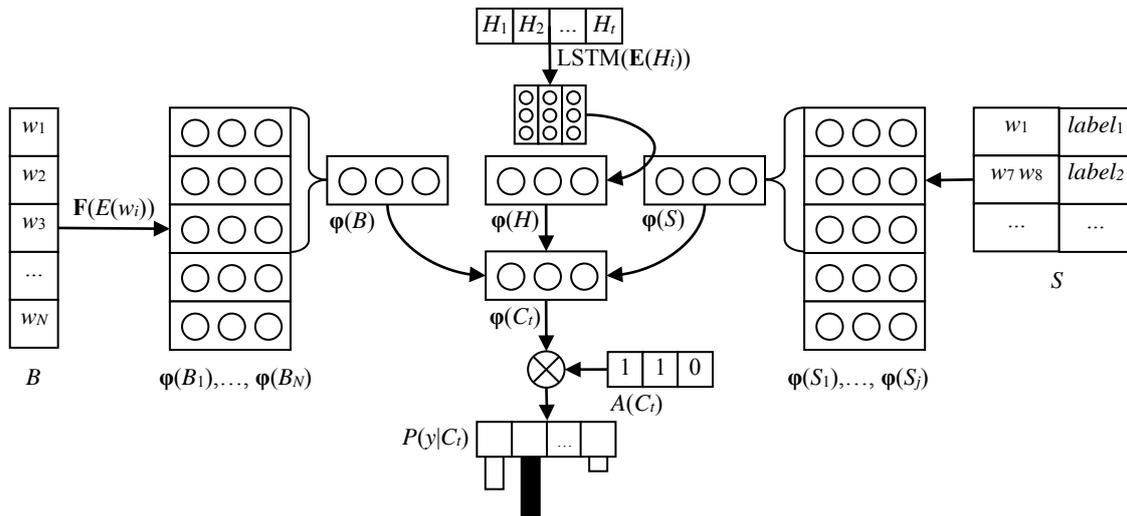


Рис. 3. Архитектура нейросетевой модели для извлечения составных объектов и их атрибутов

Экспериментальное исследование моделей

Валидация предложенной модели была осуществлена на примере решения двух практических задач. В первой задаче необходимо извлекать из текстов отзывов оценочные высказывания потребителей товаров о качестве товаров и сервиса. Оценочным высказыванием будем называть объект, состоящий из *аспекта* – упоминания товара или его характеристики и *описания* – фразы, в которой пользователь высказывает мнение об аспекте. Связь между аспектом и описанием имеет два атрибута: тональность и тема (товар, продавец или доставка). Таким образом, в данном случае имеем $Labels = \{Аспект, Описание\}$ и $AV = \{(Тональность, Позитивная), (Тональность, Негативная), (Тема, Товар), (Тема, Продавец), (Тема, Доставка)\}$.

Для обучения и оценки модели использовались наборы отзывов из магазинов Amazon (на английском языке) и AliExpress (на русском языке), описанные в [10]. Далее будем рассматривать решение этой задачи для английского и русского языков раздельно (задачи «Товары Amazon» и «Товары AliExpress»). Во второй задаче («Сопровождение ПО») необходимо извлекать запросы из текстов обращений пользователей в службу поддержки программного продукта. Запрос состоит из *аспекта* – упоминания программного продукта или его функции и *описания* одного из следующих типов: положительное высказывание, негативное высказывание, ошибка, запрос на новую функцию. Связи между аспектом и описанием не имеют атрибутов. В таком случае имеем $Labels = \{Аспект, Положительное высказывание, Негативное высказывание, Ошибка, Запрос на функцию\}$ и $AV = \{\}$. Обучение и оценка модели проводились на наборе запросов пользователей на русском языке из магазина приложений Google Play [11]. Примеры размеченных предложений приведены в табл. 2, где фрагменты обозначены в виде [текст; тип фрагмента; номера объектов, которым фрагмент принадлежит].

В ходе экспериментов были заданы следующие гиперпараметры: количество слоев BiLSTM – 2,

размер скрытого слоя BiLSTM – 200. Общие параметры модели: размер скрытого слоя LSTM_H – 30, представление $E(H_i)$ – 30, $E(type(i))$ – 30. Векторные представления слов строятся на основе предварительно обученной модели fastText [12] в вариантах для русского и английского языков, размерность векторного пространства – 300. Выбор в пользу fastText обусловлен устойчивостью данной модели к опечаткам и эмпирическими данными, свидетельствующими о том, что он обладает лучшей точностью при работе с языками с богатой морфологией (например, русским). Оптимизация параметров модели осуществляется методом Adam со скоростью обучения $1e-3$. Для предотвращения переобучения используются техники регуляризации: дропаут (dropout) 20%. В качестве базовой альтернативы для сравнения использовалась гибридная модель из [1].

Таблица 2

Примеры текстов из наборов данных

Товары Amazon
The [phone:A:1,2] is [in good shape:O:1] and [works fine:O:2].
[Its:A:1] [fast:O:1], [lots of:O:2] [free apps:A:2], [nice:O:3] [screen size:A:3] and [easy to:O:4] [work:A:4]
Товары AliExpress
[Нежный:O:1] [плед:A:1,2] [для самых маленьких:O:2])
[Хорошо стирается:O:1], [тонкий:O:2] и [чистый:O:3] [хлопок:A:1,2,3]
Сопровождение ПО
[карту мир:A:1] [привязать не получается:O:1]!!
[штрафы:A:1] [приходят раньше чем с почты уведомление:ПВ:1].

Критериям качества извлечения составных объектов является F-мера, рассчитываемая отдельно для каждого вида фрагментов и связей между ними. Так как определение точных границ фрагментов является сложной задачей даже для человека, F-мера для них рассчитывалась по методике, предложенной в [13]. Она позволяет учитывать частичные совпадения фраз и, по мнению авторов, получить более адекватную оценку.

В задачах «Товары Amazon» и «Товары AliExpress» при оценке моделей корпус был разделен на обучающую и тестовую выборки согласно [10]. В задаче «Программные продукты» использовалась процедура кроссвалидации, где в качестве блоков использовались отзывы об одном приложении. Результаты сравнения модели на основе системы переходов и гибридной модели при извлечении фрагментов и связей между ними приведены в табл. 3. Значение F-меры для фрагментов считалось усреднением значений F-меры, полученной для каждого типа фрагментов. TransRNN показывает несколько более высокую точность извлечения фрагментов и ни на одной из задач не показывает себя хуже. При определении связей между фрагментами TransRNN показывает существенный рост точности во всех трех рассмотренных задачах – на величину от 0,07 до 0,172 F1.

Таблица 3
Результаты сравнения моделей при извлечении фрагментов и связей между ними

Задача	Модель	Фрагмент F1	Связь F1
Товары Amazon	Базовая	0,713	0,620
	TransRNN	0,724	0,700
Товары AliExpress	Базовая	0,722	0,622
	TransRNN	0,722	0,693
Сопровождение ПО	Базовая	0,651	0,476
	TransRNN	0,670	0,648

В табл. 4 приведено сравнение моделей при определении атрибутов связей в задачах «Товары Amazon» и «Товары AliExpress» (в корпусе отзывов Amazon был размечен только атрибут *Тональность*). Более точное определение связей позволяет TransRNN получать лучшую точность при определении атрибутов связей – улучшение составляет от 0,03 до 0,065 F1.

Таблица 4
Результаты сравнения моделей при определении атрибутов связей

	Товары Amazon	Товары AliExpress
Тональность	0,632 (0,590)	0,652 (0,622)
Товар	–	0,595 (0,555)
Продавец	–	0,580 (0,543)
Доставка	–	0,636 (0,571)

Выводы

1. Представлена оригинальная нейросетевая модель на основе системы переходов для извлечения составных объектов и их атрибутов из текстов на естественном языке, основанная на принципе многозадачного обучения. Модель является универсальной в том смысле, что для решения конкретных прикладных задач необходимо определить типы фрагментов, из которых формируются объекты, и набор извлекаемых атрибутов.

2. Предлагаются два варианта адаптации модели для решения двух задач: извлечения мнений пользователей из текстов отзывов в интернет-магазинах Amazon и AliExpress; извлечения запросов пользователей программного продукта из текстов обращений в магазине Google Play.

3. Экспериментальное исследование точности модели по сравнению с аналогом в задачах извлечения мнений из отзывов о продуктах и извлечения запросов пользователей из текстов обращений в службу поддержки показало преимущество предложенной модели при извлечении связей и их атрибутов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования РФ, проект №FEWM-2020-0036 «Методическое и инструментальное обеспечение принятия решений в задачах управления социально-экономическими системами и процессами в гетерогенной информационной среде».

Литература

- Jebbara S. Aspect-Based Relational Sentiment Analysis Using a Stacked Neural Network Architecture / S. Jebbara, P. Cimiano // Proceedings of the 22nd European Conference on Artificial Intelligence. – Amsterdam: IOS Press, 2016. – P. 1123–1131.
- Effective LSTMs for Target-Dependent Sentiment Classification / D. Tang, B. Qin, X. Feng, T. Liu // Proceedings of the 26th International Conference on Computational Linguistics: Technical Papers. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aclweb.org/anthology/C16-1311.pdf>, свободный (дата обращения: 05.02.2020).
- An Interactive Multi-Task Learning Network for End-to-End Aspect-Based Sentiment Analysis / R. He, W.S. Lee, H.T. Ng, D. Dahlmeier // Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. – Stroudsburg: ACL, 2019. – P. 504–515.
- Large-scale Opinion Relation Extraction with Distantly Supervised Neural Network / C. Sun, Y. Wu, M. Lan, S. Sun, Q. Zhang // Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics. – Stroudsburg: ACL, 2017. – Vol. 1. – P. 1033–1043.
- Recurrent Neural Network Grammars / C. Dyer, A. Kuncoro, M. Ballesteros, N.A. Smith // Proceedings of the 15th Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. – Stroudsburg: ACL, 2016. – P. 199–209.
- Kiperwasser E. Simple and Accurate Dependency Parsing Using Bidirectional LSTM Feature Representations / E. Kiperwasser, Y. Goldberg // Transactions of the Association for Computational Linguistics. – 2016. – Vol. 4. – P. 313–327.
- Neural Architectures for Named Entity Recognition / G. Lample, M. Ballesteros, S. Subramanian, K. Kawakami, C. Dyer // Proceedings of the 15th Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. – Stroudsburg: ACL, 2016. – P. 260–270.
- Hochreiter S. Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9, № 8. – P. 1735–1780.
- Graves A. Hybrid speech recognition with Deep Bidirectional LSTM / A. Graves, N. Jaitly, A. Mohamed // 2013 IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding. – Piscataway: IEEE, 2013. – P. 273–278.
- Ехлаков Ю.П. Модель извлечения пользовательских мнений о потребительских свойствах товара на основе рекуррентной нейронной сети / Ю.П. Ехлаков, Е.И. Грибков // Бизнес-информатика. – 2018. – Т. 46, № 4. – С. 7–16.
- Грибков Е.И. Модель обработки запросов пользователей на этапе эксплуатации и сопровождения программного продукта / Е.И. Грибков, Ю.П. Ехлаков // Элек-

тронные средства и системы управления: матер. докладов XV Междунар. науч.-практ. конф. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 141–143.

12. Learning Word Vectors for 157 Languages / E. Grave, P. Bojanowski, P. Gupta, A. Joulin, T. Mikolov // Proceedings of the 11th International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2018). – Paris: European Language Resources Association, 2018. – P. 3483–3487.

13. Johansson R. Syntactic and semantic structure for opinion expression detection / R. Johansson, A. Moschitti // Proceedings of the 14th Conference on Computational Natural Language Learning Proceedings. – Stroudsburg: ACL, 2010. – P. 67–76.

Ехлаков Юрий Поликарпович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизации обработки информации (АОИ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-829-55-42
Эл. почта: upe@tusur.ru

Грибков Егор Игоревич

Аспирант каф. АОИ ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-905-990-85-69
Эл. почта: drmemor@gmail.com

Ehlaakov Y.P., Gribkov E.I.

Transition-based neural network model for extracting composite objects and their attributes from natural language texts

Extracting structured information from user feedback texts is a task of great scientific and commercial value. However, modern methods of extracting information from texts either do not take into account the structural relationships in the extracted knowledge or have low accuracy of their extraction. The paper proposes a transition-based neural network model for extracting composite objects and their attributes. The model is trained in multitask fashion when span extraction and link prediction tasks solved by the same components. The quality of the proposed model was tested on the tasks of processing reviews from Amazon and AliExpress stores and processing user requests from the Google Play store. The experimental results demonstrate that quality of the extraction of links between spans increases by value from 0.07 to 0.172 F1 depending on the task.

Keywords: natural language processing, machine learning, neural networks, sentiment analysis.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-47-52

References

1. Jebbara S., Cimiano P. Aspect-Based Relational Sentiment Analysis Using a Stacked Neural Network Architecture. *Proceedings of the 22nd European Conference on Artificial Intelligence*. Amsterdam, IOS Press, 2016, pp. 1123–1131.

2. Tang D., Qin B., Feng X., Liu T. Effective LSTMs for Target-Dependent Sentiment Classification. *Proceedings of the 26th International Conference on Computational Linguistics: Technical Papers*. Available at: <https://www.aclweb.org/anthology/C16-1311.pdf> (Accessed: February 2, 2020).

3. He R., Lee W.S., Ng H.T., Dahlmeier D. An Interactive Multi-Task Learning Network for End-to-End Aspect-

Based Sentiment Analysis. *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. Stroudsburg, ACL, 2019, pp. 504–515.

4. Sun C., Wu Y., Lan M., Sun S., Zhang Q. Large-scale Opinion Relation Extraction with Distantly Supervised Neural Network. *Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics*. Stroudsburg, ACL, 2017, v. 1, pp. 1033–1043.

5. Dyer C., Kuncoro A., Ballesteros M., Smith N.A. Recurrent Neural Network Grammars. *Proceedings of the 15th Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*. Stroudsburg, ACL, 2016, pp. 199–209.

6. Kiperwasser E., Goldberg Y. Simple and Accurate Dependency Parsing Using Bidirectional LSTM Feature Representations. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*. 2016, v. 4, pp. 313–327.

7. Lample G., Ballesteros M., Subramanian S., Kawakami K., Dyer C. Neural Architectures for Named Entity Recognition. *Proceedings of the 15th Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*. Stroudsburg, ACL, 2016, pp. 260–270.

8. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation*. 1997, v. 9, no. 8, pp. 1735–1780.

9. Graves A., Jaitly N., Mohamed A. Hybrid speech recognition with Deep Bidirectional LSTM. *2013 IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding*. Piscataway, IEEE, 2013, pp. 273–278.

10. Gribkov E.I., Ehlaakov Y.P. [User opinion extraction model concerning consumer properties of products based on a recurrent neural network]. *Business Informatics*. 2018, v. 46, no. 4, pp. 7–16 (in Russ.).

11. Gribkov E.I., Ehlaakov Y.P. *Model obrabotki zaprosov polzovatelej na etape ekspluatatsii i soprovozhdeniya programmnogo produkta* [Model for user requests processing at operation and maintenance stage of the software product]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: materialy dokladov XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Electronic Devices and Control Systems: XV International Scientific-practical Conference]. Tomsk, V-Spektr, 2019. Part 2, pp. 141–143 (in Russ.).

12. Grave E., Bojanowski P., Gupta P., Joulin A., Mikolov T. Learning Word Vectors for 157 Languages. *Proceedings of the 11th International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2018)*. Paris, European Language Resources Association, 2018, pp. 3483–3487.

13. Johansson R., Moschitti A. Syntactic and semantic structure for opinion expression detection. *Proceedings of the 14th Conference on Computational Natural Language Learning Proceedings*. Stroudsburg, ACL, 2010, pp. 67–76.

Yuri P. Ehlaakov

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Department of Automation of Information Processing,
Tomsk State University of Control Systems
and Radio-electronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-829-55-42
Email: upe@tusur.ru

Egor I. Gribkov

Post-graduate student, Department of Automation
of Information Processing TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-905-990-85-69
Email: drmemor@gmail.com

УДК 004.62

С.В. Разумников

Планирование развития облачной стратегии на основе применения многокритериальной оптимизации и метода STEM

После внедрения облачных технологий на предприятии необходимо их сопровождать и в целом управлять облачной ИТ-стратегией. Существует необходимость принятия решений по развитию использования облачных ИТ-сервисов на предприятии. Приводится пример при разработке плана развития использования облачных технологий на предприятии на основе разработанной модели с использованием методов оптимизации – многокритериального линейного программирования, а также метода ограничений STEM, который позволяет вычислить веса критериев в процессе человеко-машинного взаимодействия. Данная модель позволяет определить план развития облачной стратегии за счет оптимизации критериев, связанных с работой облачных сервисов. Оценка по критериям с идеальным вариантом предоставляется лицу, принимающему решение. На основе представленных данных выводится компромиссное решение, которое будет являться удовлетворительным в плане развития использования облачных технологий.

Ключевые слова: облачные технологии, модель, метод STEM, принятие решений, многокритериальная оптимизация, сервис, линейное программирование.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-53-61

Концепция облачных вычислений в сфере информационных технологий стала очень популярной за последние несколько лет [1]. При принятии решений о внедрении облачных технологий необходимо наличие четко проработанной ИТ-стратегии, которая помогает правильно поставить цели перед ИТ-отделом предприятия и увидеть достижение этих целей, корректировать и контролировать движение к достижению результата [2]. Эта стратегия важна не только на стадии задания цели, но и после внедрения, а также на стадии сопровождения [3].

На последнем этапе перехода к облачным технологиям проводится оптимизация [4]. Этап оптимизации облачной стратегии, а именно проработка плана развития этой стратегии, позволяет лучше и быстрее освоить преимущество облачных технологий: повысить оперативность и адаптивность бизнеса, снизить капитальные и эксплуатационные расходы, улучшить масштабируемость.

Оптимизация осуществляется с помощью следующих мероприятий:

- проверка архитектуры;
- аудит системы обеспечения безопасности;
- проверки с целью снижения расходов;
- улучшение рабочих процессов;
- индивидуальная настройка инструментов;
- поддержка после развертывания.

Поэтому и после развертывания облака важно не просто поддерживать, но и развивать облачные сервисы с учетом требования бизнеса.

Планирование развития облачной стратегии

Несмотря на то, что сегодня существуют организации, предоставляющие услуги по упрощению развертывания облачных сред на предприятии, успех проекта по внедрению во многом зависит от проработанной облачной ИТ-стратегии, а также распisanного плана действий по внедрению, развитию и сопровождению. Главная задача заключается в том, чтобы как можно быстрее получить ожидаемую эф-

фективность [5]. Понимание относительной важности этих целей совершенно необходимо для разработки эффективной стратегии облачной среды.

Кроме того, разработка такой стратегии требует от ИТ-специалистов и представителей бизнеса совместного обсуждения готовности организации к развитию облачной среды не только в смысле достаточной степени виртуализации и автоматизации инфраструктуры, но также с точки зрения культурной готовности организации к изменениям, порождаемым облачной средой [6]. Заинтересованным сторонам нужно проанализировать, как влияет использование облачных ИТ-сервисов на работу в организации, как они повлияют на выполнение производственных процессов, согласовать стратегические ожидания и требования организации к облачной среде, включая следующее [7]:

- Роль облачной среды в формировании бизнес-процессов.
- Рабочие нагрузки, получающие максимальные преимущества от облачной среды (разработка/тестирование, производство, корпоративные приложения).
- Требования к готовности, производительности и безопасности.
- Требования к вычислительной мощности, системам хранения и пропускной способности.
- Ответственность за операционную систему (ОС) и инфраструктуру и ответственность за управление.
- Интеграция с традиционной серверной инфраструктурой организации.
- Интеграция с более широкой корпоративной стратегией в области ИТ и бизнеса.

Анализ методов принятия решений при планировании развития облачной стратегии

Анализ методической литературы по теории принятия решений показывает, что при выборе ос-

новых направлений развития могут быть использованы такие популярные методы, как метод анализа иерархий, ELECTRE, методы свертки векторного критерия, методы нечетких множеств, многокритериальная оптимизация, человеко-машинные процедуры (метод STEM). Именно эти методы получили наибольшую популярность и используются при принятии решений на предприятии.

При дальнейшей поддержке облачной модели важно уделить внимание как ее техническому обслуживанию, так и возможности эффективной работы с бизнес-процессами [6, 7]. С использованием экономико-математического моделирования [8, 9] можно определить эффект от работы с облачными ИТ-сервисами, например, прибыль от выполнения определенных процессов или проектов; затраты, которые вынуждена понести организация, а также выполнение особых условий, которые позволяют реализовать использование облачных технологий

[10–12]. Здесь на помощь приходит принятие решений при многих критериях [13–16], линейное программирование. В задачах принятия решений при многих критериях большую популярность получил метод ELECTRE [17–20], особо успешно применяемый в многоцелевых задачах со своеобразной комбинацией шкал, а также метод ограничений STEM. В отличие от ELECTRE в методе STEM веса назначаются не ЛПП, а при помощи человеко-машинного взаимодействия. Результаты при использовании построенной модели будут определяться после проведения нескольких итераций по алгоритму STEM. Эти данные позволяют получить достаточно точные значения для принятия решений.

Приведем сравнение широко известных методов поддержки принятия решений, которые можно применить в данной предметной области. Сравнительная таблица методов с указанием достоинств и недостатков приведена в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов поддержки принятия решений

Название метода	Суть метода	Область применения	Достоинства	Недостатки
Анализ иерархий	Декомпозиция проблемы на более простые ее составляющие части и дальнейшая обработка последовательности суждений ЛПП по парным сравнениям	При планировании промышленности, банковского дела, в сфере городского хозяйства, координации общественных услуг, выработка стратегии, оценка рисков и др.	Принимает во внимание «человеческий фактор»; не находится в зависимости от сферы деятельности, в которой решается; дает удобные средства учета экспертной информации; прост по своей организации	Нет средств для проверки достоверности данных; дает лишь метод рейтингования альтернатив; используются в основном процедуры парных сравнений, которые могут быть противоречивыми
ELECTRE	Для вершин, не сравнимых по абсолютному доминированию, вводятся индексы согласия и несогласия, учитывающие относительную важность критериев	Ситуации, когда критерии не просто упорядочены, а имеют количественную оценку важности, но альтернативы решений при этом оцениваются в качественной шкале	Является человеко-машинной процедурой; успешно себя зарекомендовал; был решен ряд серьезных задач; представление в виде графа предпочтений	Количество альтернатив должно быть небольшим, а критерии должны быть количественными; построенное отношение относительного доминирования не обладает свойствами транзитивности
STEM	Определение весов критериев; процесс принятия решений происходит с применением итераций, в каждой из которых имеется фаза расчетов и фаза анализа	В многокритериальных задачах линейного программирования	Основан на человеко-машинном взаимодействии; успешно применяется совместно с многокритериальным линейным программированием; отсутствует право на ошибку за счет установления порога	Возможно выполнение большого числа итераций
Аддитивная свертка	Предполагает подход, когда низкие оценки по критериям имеют одинаковый статус по сравнению с высокими	Для нахождения обобщенного интегрального показателя по критериям для альтернативы	Простота использования	Высокие оценки могут компенсироваться низкими
Нечеткий вывод	Реализует эвристический подход с построением функции принадлежности и продукционных правил	В области управления и принятии решений в условиях неопределенности и недостатка информации	Позволяет удачно представить мышление человека; модели просты для понимания на качественном уровне	Отсутствие строгих математических моделей и алгоритмов, основано на соображениях «здравого смысла»

Был проведен следующий эксперимент. Рассматривались три варианта (инновационные проекты по развитию организации), и проводилась их

оценка при помощи различных пяти методов принятия решений. В результате расчетов были получены данные по каждому проекту. На рис. 1 представлены

результаты сравнительного анализа, полученные различными методами принятия решений при оценке инновационных проектов по развитию. Для результатов, полученных по методам ELECTRE и STEM, было выполнено приведение к общему виду.

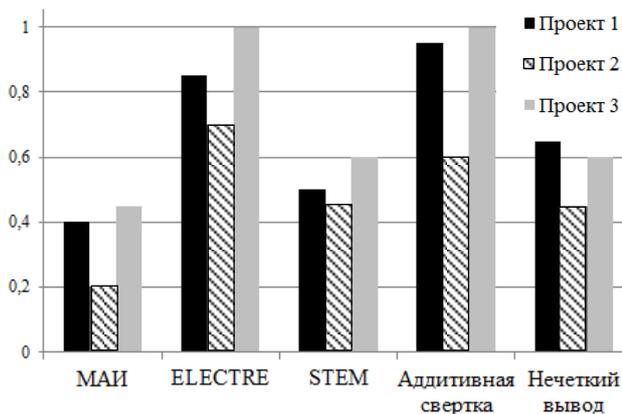


Рис. 1. Результаты сравнительного анализа

Как видим из рисунка, несмотря на то, что исходная информация является последовательной и непротиворечивой, полученные результаты отличаются. И даже там, где результаты совпадают, значения различны. Как отмечено в работе [21], несовпадение результатов, полученных разными методами, объясняется, с одной стороны, различными способами представления экспертной информации, с другой стороны, различием подходов к принятию решений. Данный анализ также показывает производительность этих методов.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что:

- каждый метод имеет свои ограничения, и исследователь должен получить представление о методе перед тем, как его использовать;
- основной проблемой многокритериального выбора являются выбор критериев, а также возможные способы вычисления интегральных оценок;
- широкие возможности для представления информации дает эвристический подход;
- важность использования более точных весовых коэффициентов;
- чем лучше формализована задача, тем лучше.

Остановимся на выборе использования метода STEM, так как в отличие от других методов позволяет указывать веса критериев через человеко-машинные процедуры, что позволит более точно проанализировать план развития облачных сервисов.

Рассмотрим задачу по принятию решений о развитии использования облачных ИТ-сервисов на предприятии. Инструментом для анализа будет являться *многокритериальная оптимизационная модель линейного программирования* с применением метода STEM.

Метод STEM

В некоторых методах принятия решения ЛПР (лицу, принимающему решение) необходимо самому задавать веса критериев, что является весьма за-

труднительно. Но существуют процедуры, которые основаны на человеко-машинном взаимодействии. В таких процедурах процесс принятия решений происходит с применением итераций, в каждой из которых имеется фаза расчетов и фаза анализа.

Расчеты проводятся, как правило, при помощи компьютера, так как они очень сложны и занимают много времени. На компьютере вычисляется решение, которое будет соответствовать достигнутому уровню понимания проблемы, и с учетом дополнительной информации предлагается ЛПР.

Фаза анализа будет проводиться ЛПР. Он будет оценивать представленное решение и определять, будет ли это решение удовлетворительным. Если такое решение будет приемлемым, то процедура заканчивается, иначе ЛПР проводит анализ дополнительной информации и передает ее на компьютер для корректировки решения.

Одним из таких методов, помогающим определить веса критериев, является метод ограничений STEM для многокритериального линейного программирования. В данном методе применяется линейная свертка, где веса критериев не устанавливаются заранее, а вычисляются в результате человеко-машинного взаимодействия.

Приведем задачу многокритериального линейного программирования с целевыми функциями:

$$u_j(X) = c_j^T \rightarrow \max, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

при следующих ограничениях:

$$\begin{aligned} a_i^T X &\leq b_i, \quad i = 1, \dots, m; \\ X &\geq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где u – целевая функция (критерий); X – переменные, в нашем случае x_1 и x_2 , т.е. проекты А и Б; j – количество критериев (целевых функций); a – система ограничений; b – сами ограничения; i – количество ограничений (уравнений в системе).

Алгоритм первой итерации метода STEM будет описываться выполнением следующих шагов.

Фаза расчетов

Шаг 1. Оптимизация области допустимых решений. При помощи симплекс-метода производится оптимизация на максимум и минимум по всем критериям (1) в отдельности (индекс i , где $1 \leq i \leq n$ обозначим критерии, по которым будет выполняться оптимизация). Таким образом, находим по каждому измерению u_i^{\min} , u_i^{\max} и значения переменных X_i^{\max} , дающие максимум, границы достижимой области. В каждой точке X_i^{\max} вычисляются значения остальных критериев, они составляют матрицу оптимальных значений размерности $n \times n$. Далее нормализуем столбцы матрицы по формуле (3), диагональные же элементы будут равняться единице (табл. 2).

$$u'_j = \frac{u_j - u_j^{\min}}{u_j^{\max} - u_j^{\min}}, \quad (3)$$

где $[u_j^{\min}, u_j^{\max}]$ – соответственно наименьшие и наибольшие оценки по j -му критерию.

Такая матрица будет содержать информацию об области допустимых решений. Если два столбца (кроме единицы), например, будут похожи друг на друга, то это говорит о том, что эти критерии сильно зависимы, поскольку изменения других критериев одинаково влияют на два этих. И наоборот, если столбцы будут резко различаться, то это будет свидетельствовать о противоречивости критериев.

Таблица 2

**Нормализованные значения критериев
после оптимизации**

Оптимизируемый критерий i	Значения критериев			
	$u_1(X_i^{\max})$	$u_2(X_i^{\max})$...	$u_n(X_i^{\max})$
1	1	u_{12}	...	u_{1n}
2	u_{21}	1	...	u_{2n}
...
n	u_{n1}	u_{n2}	...	1

Шаг 2. Расчет технических весов критериев.

Вычисляем веса критериев по матрице с нормализованными оптимальными значениями. Такие веса принято называть *техническими*, поскольку они вычисляются, а не задаются ЛПР.

Среднее значение элементов (кроме тех, которые равны единице) j -го столбца обозначим через a_j :

$$a_j = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{i=1 \\ (i \neq j)}}^n u_{ij}. \quad (4)$$

Тогда технические веса критериев w_j определяются из системы линейных уравнений:

$$\frac{w_j}{w_1} = \frac{1-a_j}{1-a_1}, \quad j=2, \dots, n, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1.$$

Понимание значения весов воспринимаются как индексы к соответствующим критериям. Если элементы j -го столбца будут близки к единице, то после проведения оптимизации по другим критериям значение этого критерия станет ближе к наилучшему, w_j станет ближе нулю, а a_j – к единице. Этому критерию не стоит уделять много внимания. Критерию, который сильно зависит от других (когда a_j мало), следует уделить больше внимания.

Шаг 3. Оптимизация функции ценности. Здесь проводим линейную свертку частных критериев с полученными техническими весами. Функция ценности (обобщенный критерий) будет иметь вид

$$u(X) = \sum_{j=1}^n w_j u_j(X) = \left(\sum_{j=1}^n w_j c_j \right)^T X \rightarrow \max. \quad (6)$$

Далее проводим максимизацию функции ценности на множестве допустимых решений. Полученное в ходе решений оптимальное значение предьявляется ЛПР вместе со значениями всех других критериев для этого решения:

$$u^* = (u_1(X^*), \dots, u_n(X^*))^T.$$

Фаза анализа

Шаг 4. Проверка на окончание работы. Анализируется вектор со значениями критериев u^* , который найден по обобщенному критерию (6) при оптимизации. Решение считается найденным в случае, если значения по всем компонентам будут удовлетворительными.

Шаг 5. Задание порога. Если же полученные значения не будут удовлетворять ЛПР, то он должен указать критерий u_k , который, по его мнению, будет иметь наихудшее значение, и определить для него минимальный порог h_k . При достижении этого порога значение критерия будет считаться удовлетворительным:

$$u_k(X) = c_k^T X \geq h_k. \quad (7)$$

Условие (7) необходимо добавить к системе ограничений (2), которые будут определять область допустимых значений переменных.

Фаза анализа на этом закончена. Далее необходимо провести итерацию фазы расчетов уже с новой областью допустимых значений и т.д. Процедура прекращается после достижения по всем критериям приемлемых значений для ЛПР.

Применение метода STEM в принятии решений на развитие использования облачных ИТ-сервисов

Рассмотрим общий пример при разработке плана развития использования облачных технологий на предприятии с использованием методов оптимизации – многокритериального линейного программирования, а также метода ограничений STEM, который позволяет вычислить веса критериев в процессе человеко-машинного взаимодействия. Данный пример будет служить шаблоном для подобных расчетов с большим количеством критериев, используемых технологий или выполняемых проектов (вычислительных процедур). После проведенных расчетов анализируется полученное компромиссное решение и сравнивается с идеальным. Если все компоненты будут иметь удовлетворительные значения, то решение получено и принимается ЛПР при планировании развития облачной стратегии.

Определим основные составляющие задачи линейного программирования целевых функций: u_1 – общая прибыль от реализации суточного (или может быть месячного) плана; u_2 – целевая функция: затраты от реализации суточного (или может быть месячного) плана; u_3 – целевая функция, связанная с экспортом продукции/услуг или увеличением производства.

В табл. 3 представлены основные данные задачи для критерия «Прибыль».

Для другого критерия «Затраты» значения для целевой функции будут следующие: для А затраты за обработку одной вычислительной процедуры / проекта составляют 10 ед., для В – 5 ед. Знаки у коэффициентов второй целевой функции будут изменены, чтобы оптимизации совпадали.

Таблица 3

Основные данные задачи для критерия «Прибыль»			
Облачные сервисы	Затраты на обработку одной вычислительной процедуры/проекта (усл. ед.)		Ограничения, усл. ед.
	A	B	
I (IaaS)	10	5	50
II (SaaS)	6	9	54
Прибыль за выполнение одной процедуры/проекта	8	6	

Предположим, что предприятие из стратегических соображений заинтересовано в экспорте своей продукции/услуг или увеличении производства товара. Таким образом, планирование развития ИТ-сферы с использованием облачных технологий опишем следующей задачей многоцелевого линейного программирования:

$$\begin{aligned}
 u_1(x_1, x_2) &= 8x_1 + 6x_2 \rightarrow \max, \\
 u_2(x_1, x_2) &= -10x_1 - 5x_2 \rightarrow \max, \\
 u_3(x_1, x_2) &= x_1 \rightarrow \max, \\
 10x_1 + 5x_2 &\leq 50, \\
 6x_1 + 9x_2 &\leq 54, \\
 x_1, x_2 &\geq 0.
 \end{aligned}$$

Итерация 1

Шаг 1. Проводим поочередную оптимизацию на минимум и максимум по трем критериям, исследуя область допустимых решений. Полученные результаты сведем в табл. 4, в которой строки будут соответствовать критериям выполненной оптимизации.

Таблица 4

i	Оптимизация			Значения критериев		
	u_i^{\max}	u_i^{\min}	X_i^{\max}	$u_1(X_i^{\max})$	$u_2(X_i^{\max})$	$u_3(X_i^{\max})$
1	48	0	$(3,4)^T$	48	-50	3
2	0	-50	$(0,0)^T$	0	0	0
3	5	0	$(5,0)^T$	40	-50	5

Приведем нормализованные значения критериев и соответствующие значения a_j (табл. 5).

Таблица 5

Нормализованные значения критериев со значениями a_j			
i	Значения критериев		
	$u_1(X_i^{\max})$	$u_2(X_i^{\max})$	$u_3(X_i^{\max})$
1	1	0	0,6
2	0	1	0
3	0,833	0	1
a_j	0,417	0	0,3

Шаг 2. Составляем уравнения для нахождения технических весов критериев:

$$\begin{aligned}
 w_2 &= \frac{1-a_2}{1-a_1} w_1 = 1,714w_1, \\
 w_3 &= \frac{1-a_3}{1-a_1} w_1 = 1,2w_1, \\
 w_1 + w_2 + w_3 &= 1,
 \end{aligned}$$

откуда $w_1 = 0,255, w_2 = 0,438, w_3 = 0,307$.

Шаг 3. Получим функцию ценности, свернув все три критерия с посчитанными техническими весами:

$$\begin{aligned}
 f(x_1, x_2) &= (0,255 \cdot 8 - 0,438 \cdot 10 + 0,307 \cdot 1)x_1 + \\
 &+ (0,255 \cdot 6 - 0,438 \cdot 5 + 0,307 \cdot 0)x_2 = -2,029x_1 - 0,657x_2.
 \end{aligned}$$

Решим задачу линейного программирования с целевой функцией и ограничениями, получим $X^* = (0,0)^T$. Вычислим значения критериев в этой точке и предоставим их ЛПР с идеальными значениями, которые были получены при оптимизации по критериям (табл. 6):

Таблица 6

Сравнение вычисленных значений с идеальными значениями, полученными при оптимизации			
	u_1 (прибыль)	u_2 (затраты)	u_3 (экспорт)
Идеал	48	0	5
X^*	0	0	0

Шаг 4. Анализ ЛПР полученного решения показывает его неприемлемость. Наибольшее неудовлетворение вызывает критерий u_1 – нулевая прибыль.

Шаг 5. Далее необходимо установить подходящий порог h_1 . Для этого необходимо рассчитать несколько вариантов оптимизации по данному критерию при различных значениях порога. Для этой цели добавим дополнительное неравенство к исходным ограничениям:

$$u_1(x_1, x_2) = 8x_1 + 6x_2 \geq h_1.$$

Решим несколько задач максимизации с функцией ценности (8) и с добавленным ограничением. Результаты расчетов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Расчеты нескольких вариантов оптимизации			
Вариант	u_1 (прибыль)	u_2 (затраты)	u_3 (экспорт)
Идеал	48	0	5
$h_1 = 20$	20	-16,67	0
$h_1 = 24$	24	-20	0
$h_1 = 30$	30	-25	0
$h_1 = 36$	36	-30	0

ЛПР в качестве компромиссного значения выбирает порог $h_1 = 30$, при котором величина затрат невысока и прибыль удовлетворительна.

На этом итерация анализа заканчивается. Допустимые решения в новом множестве определим неравенствами:

$$\begin{aligned}
 10x_1 + 5x_2 &\leq 50, \\
 6x_1 + 9x_2 &\leq 54, \\
 8x_1 + 6x_2 &\geq 30, \\
 x_1, x_2 &\geq 0.
 \end{aligned}$$

Итерация 2

Шаг 1. Проводим расчеты по исследованию множества допустимых решений аналогично предыдущей итерации. Представим результаты расчетов (табл. 8) с уже нормализованными значениями.

Шаг 2. Аналогичным образом получаем технические веса по матрице значений критериев:

$$w_1 = 0,2982, w_2 = 0,4128, w_3 = 0,2890.$$

Шаг 3. Функция ценности будет иметь следующий вид:

$$f(x_1, x_2) = -1,45413x_1 - 0,27523x_2. \quad (8)$$

Таблица 8

Расчеты нескольких вариантов оптимизации

i	Оптимизация			Нормализованные значения критериев		
	u_i^{\max}	u_i^{\min}	X_i^{\max}	$u_1(X_i^{\max})$	$u_2(X_i^{\max})$	$u_3(X_i^{\max})$
1	48	30	(3,4) ^T	1	0	0,6
2	-25	-50	(0,5) ^T	0	1	0
3	5	0	(5,0) ^T	0,555	0	1

Покажем область допустимых решений по второй итерации за счет введения ограничения $u_1(x_1, x_2) = 8x_1 + 6x_2 \geq 30$ (рис. 2, а). Нахождение максимума функции ценности (8) при заданных ограничениях дает оптимальное решение $X^* = (0,5)^T$. На рисунке показаны дополнительные ограничения, а также направления возрастания функции ценности (обобщенного критерия) и частных критериев.

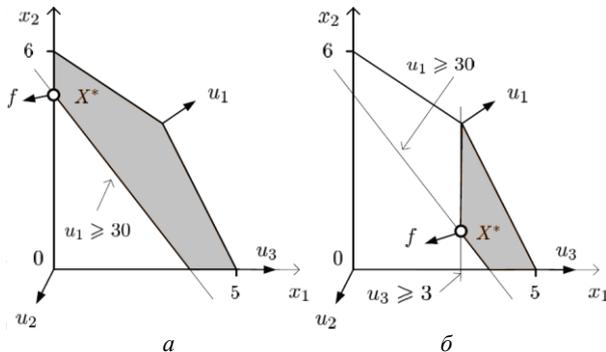


Рис. 2. Область допустимых решений метода STEM: а – на второй итерации; б – на третьей итерации

Приведем оценки (табл. 9) по всем критериям с идеальным решением.

Таблица 9

Сравнение вычисленных значений с идеальными значениями, полученными при оптимизации

	u_1 (прибыль)	u_2 (затраты)	u_3 (экспорт)
Идеал	48	0	5
X^*	30	-25	0

Шаг 4. ЛПР считает снова его неприемлемым, так как экспорт нулевой. Данное значение критерия считается неудовлетворительным.

Шаг 5. Добавим дополнительное неравенство к ограничениям для установления подходящего порога h_3 .

$$u_3(x_1, x_2) = x_1 \geq h_3.$$

Максимизируем (8), изменяя h_3 . Результаты расчетов представим в табл. 10.

Из представленных вариантов ЛПР выбирает $h_3 = 3$. Новое множество для допустимых решений определим неравенствами:

$$\begin{aligned} 10x_1 + 5x_2 &\leq 50, \\ 6x_1 + 9x_2 &\leq 54, \\ 8x_1 + 6x_2 &\geq 30, \\ x_1 &\geq 3, \\ x_1, x_2 &\geq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Таблица 10

Расчеты нескольких вариантов оптимизации

Вариант	u_1 (прибыль)	u_2 (затраты)	u_3 (экспорт)
Идеал	48	0	5
$h_3 = 2$	30	-31,67	2
$h_3 = 3$	30	-35	3
$h_3 = 4$	32	-40	4

Итерация 3

В результате аналогичных расчетов получаем следующие результаты (табл. 11):

Таблица 11

Расчеты нескольких вариантов оптимизации

i	Оптимизация			Нормализованные значения критериев		
	u_i^{\max}	u_i^{\min}	X_i^{\max}	$u_1(X_i^{\max})$	$u_2(X_i^{\max})$	$u_3(X_i^{\max})$
1	48	30	(3,4) ^T	1	0	0
2	-35	-50	(3,1) ^T	0	1	0
3	5	3	(5,0) ^T	0,555	0	1

Отсюда веса критериев:

$$w_1 = 0,2653, w_2 = 0,3673, w_3 = 0,3673.$$

Функция ценности на 3-й итерации будет иметь вид (10):

$$f(x_1, x_2) = -1,18367x_1 - 0,2449x_2. \quad (10)$$

На рис. 1, б представлена иллюстрация процесса максимизации (10) при ограничениях (9). Как видно, область допустимых решений сократилась за счет ограничения $u_3(x_1, x_2) = x_1 \geq 3$ по сравнению с предыдущей итерацией.

По 3-й итерации оптимальное решение $X^* = (3,1)^T$, т.е. план развития облачной стратегии предполагает выполнения 3 условных единиц проектов/вычислительных операций А и 1-й В. Оценка по трем критериям с идеальным вариантом (табл. 12) представляется ЛПР.

Таблица 12

Сравнение вычисленных значений с идеальными значениями, полученными при оптимизации

	u_1 (прибыль)	u_2 (затраты)	u_3 (экспорт)
Идеал	48	0	5
X^*	30	-35	3

Работа алгоритма завершена, так как ЛПР считает представленное компромиссное решение удовлетворительным.

Анализ полученных результатов на развитие использования облачных ИТ-сервисов

В результате проведения нескольких итераций по методу STEM было получено удовлетворительное для ЛПР компромиссное решение с учетом заданных порогов. Приведем сравнение расчетов при использовании только линейного программирования и с применением метода STEM. В табл. 13 представлено сравнение оценок многокритериальной оптимизации с/без метода STEM.

Таблица 13

Сравнение вычисленных значений многокритериальной оптимизации с/без метода STEM

Критерии	Идеал	Оптимальное значение без STEM	Оптимальное значение с STEM
u_1	48	0	30
u_2	0	0	-35
u_3	5	0	3

В столбце «Оптимальное значение без STEM» по всем трем критериям вычисленные значения равны 0 (согласно табл. 6). Далее был уже добавлен порог h и выполнены итерации по методу STEM. Окончательные значения критериев представлены в столбце «Оптимальное значение с STEM».

Как видим, использование метода STEM позволяет ЛПР рассмотреть недоминируемый критериальный вектор и указать, на какие уступки можно идти и на какую величину. За счет выполнения таких итераций исключается право на ошибку, а главное, что это решение является удовлетворительным для ЛПР. К тому же эти данные позволяют получить достаточно точные значения для принятия решений.

Заключение

В статье представлен пример при разработке плана развития использования облачных технологий на предприятии на основе разработанной модели с использованием методов оптимизации – многокритериального линейного программирования, а также метода ограничений STEM, который позволяет вычислить веса критериев в процессе человеко-машинного взаимодействия. Данная модель позволяет определить план развития облачной стратегии за счет оптимизации критериев, связанных с работой облачных сервисов. Оценка по критериям с идеальным вариантом предоставляется лицу, принимающему решение. На основе представленных данных выводится компромиссное решение, которое будет являться удовлетворительным в плане развития использования облачных технологий.

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. Paul P.K. Cloud Computing: possibilities, challenges and opportunities with special reference to its emerging need in the academic and working area of Information Science / P.K. Paul, M.K. Ghose // International conference on

modelling optimization and computing. – 2012. – Vol. 38. – P. 2222–2227.

2. Reynolds P. Aligning business and IT strategies in multi-business organization / P. Reynolds, P. Yetton // Journal of information technology. – 2015. – Vol. 30, No. 2. – P. 101–118.

3. A cloud server energy consumption measurement system for heterogeneous cloud environments / W. Lin, H. Wang, Y. Zhang, D. Qi, J. Wang, V. Chang // Information Sciences. – 2018. – Vol. 468. – P. 47–62.

4. Jones S. Cloud computing procurement and implementation: Lessons learnt from a United Kingdom case study // International journal of information management. – 2015. – Vol. 35, No. 6. – P. 712–716.

5. Razumnikov S.V. Decision support system of transition IT-applications in the cloud environment / S.V. Razumnikov, M.S. Kremnyova // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings. – Omsk, 2015, May 21–23. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7147186> (дата обращения: 22.11.2019).

6. Elamir A.M. Framework and architecture for programming education environment as cloud computing service / A.M. Elamir, N. Jailani, M.A. Dakar // Procedia Technol. – 2013. – Vol. 11. – P. 1299–1308.

7. Sultan N. Knowledge management in the age of cloud computing and Web 2.0: Experiencing the power of disruptive innovations // International journal of information management. – 2013. – Vol. 33, No. 1. – P. 160–165.

8. Maroukhine O.V. Expert support system for making decision by the results of computer-based testing within the ends of teaching quality evaluation / O.V. Maroukhine, O.G. Berestneva // Proceedings – KORUS 2003: 7th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. – 2003. – Vol. 2. – P. 416–419.

9. Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy / S. Breedveld, D. Craft, R. Haveren, B. Heijmen // European Journal of Operational Research. – 2019. – Vol. 277, No. 1. – P. 1–19.

10. Razumnikov S.V. Models of evaluating efficiency and risks on integration of cloud-base IT-services of the machine-building enterprise: a system approach / S.V. Razumnikov, A.K. Kurmanbay // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124, No. 1. – P. 1–5.

11. Разумников С.В. Модель поддержки принятия решений о миграции корпоративных приложений в облачную среду // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2015. – Т. 194, № 5. – С. 490–502.

12. Разумников С.В. Интегральная модель оценки результативности внедрения облачных ИТ-сервисов // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2016. – Т. 201, № 4. – С. 492–504.

13. Measurement of chip morphology and multi criteria optimization of turning parameters for machining of AISI 4340 steel using Y-ZTA cutting insert / B.K. Singh, H. Roy, B. Mondal, S.S. Roy, N. Mandal // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. – 2019. – Vol. 142. – P. 181–194.

14. Sensitivity analysis and multi-criteria optimization of SMA cable restrainers for longitudinal seismic protection of isolated simply supported highway bridges / J.Q. Wang, S. Li, F. Hedayati Dezfuli, M.S. Alam // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 189. – P. 509–522.

15. A multicriteria stochastic optimization framework for sustainable forest decision making under uncertainty / E. Álvarez-Miranda, J. Garcia-Gonzalo, C. Pais, A. Weintraub // Forest Policy and Economics. – 2019. – Vol. 103. – P. 112–122.

16. Micale R. A combined interval-valued ELECTRE TRI AND TOPSIS approach for solving the storage location

assignment problem / R. Micale, C.M. La Fata, G. La Scalia // *Computers and Industrial Engineering*. – 2019. – Vol. 135. – P. 199–210.

17. Zhou H. Stochastic multicriteria decision-making approach based on SMAA-ELECTRE with extended gray numbers / H. Zhou, J.Q. Wang, H.Y. Zhang // *International Transactions in Operational Research*. – 2019. – Vol. 26, No. 5. – P. 2032–2052.

18. Novel operations of PLTSs based on the disparity degrees of linguistic terms and their use in designing the probabilistic linguistic ELECTRE III method / H. Liao, L. Jiang, B. Lev, H. Fujita // *Applied Soft Computing Journal*. – 2019. – Vol. 80. – P. 450–464.

19. An application of the ELECTRE TRI-C method to characterize government performance in OECD countries / A.S. Costa, J. Rui Figueira, C.R. Vieira, I.V. Vieira // *International Transactions in Operational Research*. – 2019. – Vol. 26, No. 5. – P. 1935–1955.

20. Akram M. Novel Approach in Decision Making with m-Polar Fuzzy ELECTRE-I / M. Akram, N. Waseem, P. Liu // *International Journal of Fuzzy Systems*. – 2019. – Vol. 21, No. 4. – P. 1117–1129.

21. Андрейчиков А.В. Системный анализ стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М.: Книжный дом «ЛИБРИКОМ», 2013. – 304 с.

Разумников Сергей Викторович

Канд. техн. наук, доцент Юргинского технологического института (ф-ла) Национального исследовательского Томского политехнического университета
Ленинградская ул., д. 26, г. Юрга, Россия, 652057
Тел.: +7 (384-5) 17-77-64
Эл. почта: demolove7@inbox.ru

Razumnikov S.V.

Cloud strategy development planning based on multi-criteria optimization and STEM method

After the introduction of cloud technologies in the enterprise, it is necessary to accompany it and generally manage the cloud IT-strategy. There is a need to make decisions on the development of the use of cloud IT-services in the enterprise. The article provides an example when developing a development plan for using cloud technologies in an enterprise is based on the developed model using optimization methods - multicriteria linear programming, as well as the STEM constraint method, which allows calculating the weight of criteria in the process of human-machine interaction. This model allows to define a cloud strategy development plan by optimizing criteria related to the operation of cloud services. An ideal criteria assessment is provided to the decision maker. Based on the data presented, a compromise solution is deduced, which could be relevant in the context of cloud technologies development.

Keywords: cloud technologies, model, STEM method, decision making, multi-criteria optimization, service, linear programming.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-53-61

References

1. Paul P.K., Ghose M.K. Cloud Computing: possibilities, challenges and opportunities with special reference to its emerging need in the academic and working area of Information Science. *International conference on modelling optimization and computing*, 2012, vol. 38, pp. 2222–2227.
2. Reynolds P., Yetton P. Aligning business and IT strategies in multi-business organization. *Journal of Information Technology*, 2015, vol. 30, no, pp. 101–118.
3. Lin W., Wang H., Zhang Y., Qi D., Wang J., Chang V. A cloud server energy consumption measurement system for heterogeneous cloud environments. *Information Sciences*, 2018, vol. 468, pp. 47–62.
4. Jones S. Cloud computing procurement and implementation: Lessons learnt from a United Kingdom case study. *International Journal of Information Management*, 2015, vol. 35, no 6, pp. 712–716.
5. Razumnikov S.V, Kremnyova M.S. Decision support system of transition IT-applications in the cloud environment. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings. – Omsk, 2015, May 21–23*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7147186> (Accessed: November 22, 2019).
6. Elamir A.M., Jailani N, Dakar M.A. Framework and architecture for programming education environment as cloud computing service. *Procedia Technolog*, 2013, vol. 11, pp. 1299–1308.
7. Sultan N. Knowledge management in the age of cloud computing and Web 2.0: Experiencing the power of disruptive innovations. *International Journal of Information Management*, 2013, vol. 33, no. 1, pp. 160–165.
8. Maroukhine O.V., Berestneva O.V. Expert support system for making decision by the results of computer-based testing within the ends of teaching quality evaluation. *Proceedings – KORUS 2003: 7th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology*, 2003, vol. 2, pp. 416–419.
9. Breedveld S., Craft D., Haveren R., Heijmen B. Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy. *European Journal of Operational Research*, 2019, vol. 277, no. 1, pp. 1–19.
10. Razumnikov S.V. [Evaluation of the effectiveness and risks of implementing cloud IT services]. *Basic research*, 2014, no 11-1, pp. 33–38 (in Russ.)
11. Razumnikov S.V. [Decision support model for migrating enterprise applications to the cloud]. *Scientific works of the Free Economic Society of Russia*, 2015, vol 194, no 5, pp. 490–502 (in Russ.)
12. Razumnikov S.V. [Integrated Cloud IT Services Performance Evaluation Model]. *Scientific works of the Free Economic Society of Russia*, 2016, vol. 201, no 4, pp. 492–504.
13. Singh B.K., Roy H., Mondal B., Roy S.S., Mandal N. Measurement of chip morphology and multi criteria optimization of turning parameters for machining of AISI 4340 steel using Y-ZTA cutting insert. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2019, vol. 142, pp. 181–194.
14. Wang J.Q., Li S., Hedayati Dezfuli F., Alam M.S. Sensitivity analysis and multi-criteria optimization of SMA cable restrainers for longitudinal seismic protection of isolated simply supported highway bridges. *Engineering Structures*, 2019, vol. 189, pp. 509–522.
15. Álvarez-Miranda E., Garcia-Gonzalo J., Pais C., Weintraub A. A multicriteria stochastic optimization framework for sustainable forest decision making under uncertainty. *Forest Policy and Economics*, 2019, vol. 103, pp. 112–122.

16. Micale R., La Fata C.M., La Scalia G. A combined interval-valued ELECTRE TRI AND TOPSIS approach for solving the storage location assignment problem. *Computers and Industrial Engineering*, 2019, vol. 135, pp. 199–210.

17. Zhou H., Wang J.Q., Zhang H.Y. Stochastic multicriteria decision-making approach based on SMAA-ELECTRE with extended gray numbers. *International Transactions in Operational Research*, 2019, vol. 26, no. 5, pp. 2032–2052.

18. Liao H., Jiang L., Lev B., Fujita H Novel operations of PLTSs based on the disparity degrees of linguistic terms and their use in designing the probabilistic linguistic ELECTRE III method. *Applied Soft Computing Journal*, 2019, vol. 80, pp. 450–464.

19. Costa A.S., Rui Figueira J., Vieira C.R., Vieira I.V. An application of the ELECTRE TRI-C method to characterize government performance in OECD countries. *International Transactions in Operational Research*, 2019, vol. 26, no. 5, pp. 1935–1955.

20. Akram M., Waseem N. Novel Approach in Decision Making with m-Polar Fuzzy ELECTRE-I. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 1117–1129.

21. Andreichikov A.V., Andreichikova O.N. [Systematic analysis of strategic decisions in innovation. Mathematical, heuristic and intellectual methods of system analysis and synthesis of innovations]. Moscow, Book House "LIBRICOM", 2013. 304 p.

Sergey V. Razumnikov

Candidate of Engineering Sciences, 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 004.89:622.276

И.В. Евсюткин, Н.Г. Марков

Управление геолого-техническими мероприятиями на месторождениях нефти и газа с использованием искусственных нейронных сетей

Своевременный выбор скважин-кандидатов на проведение геолого-технических мероприятий (ГТМ) и выбор конкретных ГТМ для таких скважин являются актуальными задачами для нефтегазодобывающих компаний. Сегодня решение этих задач осуществляется преимущественно за счёт большого опыта и интуиции специалиста-геолога. Более того, процесс решения требует серьёзных затрат времени специалистов и не исключает ошибочных результатов, связанных с человеческим фактором. Поэтому актуальным направлением исследований являются разработка и внедрение новых интеллектуальных методов анализа геологических и технологических данных при управлении ГТМ. В статье предложено при решении задач управления ГТМ использовать глубокие искусственные нейронные сети прямого распространения. Приведены результаты комплексных исследований эффективности таких нейронных сетей при управлении ГТМ, показавшие перспективность этого метода интеллектуального анализа данных при автоматизации нефтегазодобывающего производства.

Ключевые слова: геолого-технические мероприятия на месторождениях нефти и газа, автоматизация производства, интеллектуальный анализ данных, искусственные нейронные сети.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-62-69

Бурения новых скважин на эксплуатируемых месторождениях являются трудоемкими и дорогостоящими проектами, поэтому в качестве альтернативного подхода большинство нефтегазодобывающих предприятий использует методы интенсификации добычи углеводородного сырья (УВС) из существующих скважин. Среди них особый интерес представляют геолого-технические мероприятия (ГТМ), повышающие интенсивность добычи УВС.

Управление ГТМ требует значительных трудовых и временных затрат квалифицированных специалистов-геологов предприятия, которые на сегодняшний день практически вручную анализируют большие объемы разнородных геологических и технологических данных по фонду скважин, что способствует увеличению вероятности возникновения ошибок вследствие человеческого фактора [1]. Всё это указывает на актуальность разработки методов и алгоритмов высокоавтоматизированного управления ГТМ в условиях больших объёмов постоянно обновляющихся на промыслах данных.

В настоящее время всё более актуальной становится концепция интеллектуальных месторождений [2]. Неотъемлемой её частью является разработка методов интеллектуального анализа данных (ИАД) для поддержки принятия решений при управлении фондом скважин, в том числе при управлении ГТМ.

Целью данной работы является исследование эффективности глубоких искусственных нейронных сетей (ИНС) прямого распространения применительно к задачам управления ГТМ.

Интеллектуальные методы анализа данных при управлении фондом скважин

При разработке месторождений нефти и газа основным объектом управления является фонд скважин, позволяющий тем или иным способом извлекать УВС из продуктивных пластов месторождения. Сегодня управление фондом скважин добыва-

ющего предприятия – это управление совокупностью весьма сложных бизнес-процессов, начиная с планирования уровней добычи УВС, мониторинга состояния скважин и продуктивных пластов, интенсификации процессов добычи УВС и заканчивая организацией и проведением работ по текущему и капитальному ремонту скважин [3].

Среди процессов интенсификации добычи особое место занимают ГТМ. Они являются управляющими воздействиями на элементы объекта управления – скважины фонда и продуктивные пласты. Решение о проведении ГТМ принимает субъект управления – специалисты различных служб промысла, в первую очередь, геологической. Принятые ими решения о ГТМ на той или иной скважине реализуют бригады текущего и капитального ремонта скважин или при проведении сложного ГТМ специалисты подрядной организации. Важным реализуемым в системе управления фондом скважин процессом является оценка эффективности проведённых ГТМ. Такая оценка опирается на решение задачи прогноза дебитов УВС с использованием методов ИАД. Оценка эффективности позволяет сформировать обратные связи и, если это требуется, корректировать управляющие воздействия на скважины или пласты [4]. Например, довольно часто выполняется на одном и том же блоке месторождения многократный гидроразрыв пласта (ГРП) – один из перспективных методов ГТМ [5].

С другой стороны, управление ГТМ требует решения ряда сложноформализуемых задач. В первую очередь, к ним относятся задача выбора скважин-кандидатов для ГТМ и задача определения вида ГТМ для таких скважин. Для решения этих задач требуются значительные трудовые и временные затраты квалифицированных специалистов. Это ещё раз подчёркивает необходимость использования в контуре управления методов ИАД как методов

поддержки принятия решений субъектом управления в реализации таких сложноформализуемых задач.

В статье [5] приведены результаты исследования применения ИНС для прогноза параметров работы скважин после проведения ГРП на крупных месторождениях УВС. Точность результатов оказалась невысокой для последующего практического применения этих ИНС.

В работе [6] был проведён анализ операций по выравниванию профиля приёмистости для нагнетательных скважин, а также оценено влияние геолого-геофизических характеристик и технологических показателей работы скважин на результат с точки зрения прироста добычи нефти вследствие уменьшения обводнённости УВС. При этом предложено использовать ИНС для предсказания технологической эффективности от выравнивания профиля приёмистости скважин. Показано, что точность полученной модели сопоставима с таковой в методе гидродинамического моделирования пластов, но скорость работы ИНС оказалась гораздо выше.

Другим классом методов ИАД, который исследовался на предмет использования в управлении фондом скважин нефтегазодобывающих предприятий, является класс методов кластеризации данных. Так, в работе [7] применялся кластерный анализ для разделения фонда скважин месторождения на кластеры (группы) в зависимости от приоритетности проведения ГТМ, затем на подкластеры – по типу ГТМ для каждой скважины.

Основными недостатками примененного подхода являются использование для анализа только геологических данных и простейший алгоритм кластеризации, который на одном и том же наборе исходных данных может показывать различные результаты, чувствителен к шумам и требует априорного задания количества кластеров.

В статьях [8–11] приводятся первые результаты исследований при решении задачи выбора скважин-кандидатов для ГТМ с использованием ещё одного метода ИАД – метода нечёткой логики. К сожалению, эти результаты имеют невысокую точность.

Таким образом, с помощью методов ИАД получены первые обнадеживающие результаты, но на сегодняшний день они не обладают приемлемой для практиков точностью. Поэтому необходимы дальнейшие исследования новых методов ИАД применительно к задаче выбора скважин-кандидатов для ГТМ и выбора типа мероприятий на скважинах-кандидатах.

В развитие описанных выше исследований в данной работе предложено при управлении ГТМ использовать один из перспективных методов ИАД – глубокие нейронные сети прямого распространения [12]. Рассмотрены особенности подготовки обучающей и тестовой выборки для таких ИНС на основе больших массивов геологических и технологических данных на эксплуатируемом месторождении и исследована эффективность этих ИНС при решении задач управления ГТМ.

Предварительная обработка больших данных перед обучением ИНС

Большие объёмы разнородных технологических и геологических данных с датчиков и результаты ручного ввода обычно аккумулируются в базах данных (БД) информационных систем предприятий по добыче УВС. Для датчиков характерны сбои, ручной ввод также может давать ошибки в данных: опечатки, несоблюдение единиц измерений и их порядков и т.д. В результате БД содержат частично ошибочную, пропущенную и искажённую информацию, дублированные и противоречивые данные [13, 14].

При решении задач интенсификации добычи УВС важно, чтобы исходные технологические данные по фонду скважин и геологические данные по продуктивным пластам месторождения были актуальны и не содержали пропусков и ошибок. Это особенно важно для дальнейшего интеллектуального анализа таких данных и принятия решений при управлении ГТМ. Однако в реальности на промыслах другая картина. В БД информационных систем для управления производством, в которых за многие годы эксплуатации месторождения накопился огромный объём данных, довольно много пропущенных данных и ошибок ручного ввода.

Многие методы анализа данных, в том числе интеллектуальные, очень чувствительны к пропускам и выбросам в данных. Некоторые из них в таких случаях следует применять с осторожностью.

В качестве наборов данных для обучения и тестирования ИНС были выбраны значения указанных ниже параметров для каждого комплекса «скважина–пласт». Использовались следующие геологические и технологические параметры: дебит нефти Q_n , т; дебит газа Q_g , тыс. м³; дебит жидкости $Q_{ж}$, м³; дебит воды Q_w , т; давление забойное $P_{заб}$, атм; давление буферное $P_{буф}$, атм; давление затрубное $P_{зат}$, атм; температура на устье скважины T_y , °С; давление пластовое $P_{пл}$, атм; пластовая температура $T_{пл}$, °С; обводнённость W , %; эффективная мощность пласта H , м; газовый фактор B ; диаметр штуцера D , мм. К сожалению, не для всех этих параметров имеется возможность извлечь из БД достаточный объём данных для обучения ИНС.

Ручная инспекция данных сложна ввиду чрезвычайно больших объёмов данных, например, некоторые значения технологических параметров скважин поступают в БД каждые 15 мин, и даже за небольшой промежуток времени в БД накапливается большой объём данных. Более того, просмотр данных специалистом по-прежнему не страхует от новых ошибок. Поэтому перспективным решением является использование специальных программных средств, реализующих методы и правила обнаружения и исправления ошибок в таких данных.

Известно, что каждый технологический параметр скважины или геологический параметр продуктивного пласта месторождения должен находиться в определённом диапазоне значений в зависимости от месторождения и условий его эксплуата-

ции [15]. Тогда, учитывая допустимые диапазоны значений параметров, можно определить ошибочные значения этих параметров, а для их исправления использовать различные зависимости, например, закон Дарси или метод интерполяции исправляемых значений по соседним корректным значениям параметра. Ряд параметров, в первую очередь геологических, в силу своей природы не может изменяться резко. Так, например, эффективная мощность продуктивного пласта может считаться постоянной в течение длительного времени (обычно до года). Тогда в результатах ручного ввода значений таких параметров легко распознать ошибку порядка числа и автоматически её исправить.

Учитывая это, а также ряд особенностей дублируемых записей в БД технологических и геологических параметров, нами были созданы соответствующие программные средства, реализующие различные методы и алгоритмы обнаружения и исправления ошибок в исходных для последующего анализа данных [16]. Для извлечения информации из БД была создана хранимая процедура на языке SQL в СУБД Microsoft SQL Server. Результаты применения созданных программных средств и хранимой процедуры представляются в БД в виде совокупности строк, очищенных и скорректированных, упорядоченных по кустам скважин и отдельным скважинам, по времени измерения каждого параметра из набора и дате проведения каждого ГТМ. Например, строка содержит название куста, номер скважины и дату ввода её в эксплуатацию; название ГТМ, дату его начала и окончания; параметр, его значение и дату измерения.

Задачи классификации скважин и типов ГТМ с использованием ИНС

Во-первых, с целью управления ГТМ ставилась и решалась задача бинарной классификации всех добывающих скважин фонда с помощью глубоких ИНС прямого распространения. В первый класс должны попасть все скважины, которые занесены в БД и были выбраны специалистами-геологами для проведения определённого типа (вида) ГТМ – класс «скважин-кандидатов для ГТМ». Основанный на опыте и интуиции ручной выбор специалистами-геологами скважин-кандидатов для ГТМ считался эталоном при формировании обучающей выборки, если после проведённого ГТМ произошло существенное увеличение дебита скважины.

Во второй класс скважин должны входить все остальные скважины (класс «скважин не для ГТМ»), на которых в момент анализа по той или иной причине ГТМ проводить не следовало. Например, высокодебитные скважины, дающие основной объём добычи УВС на месторождении. Даже небольшая их остановка (для каких-либо работ или исследований) существенно снизит общий уровень добычи УВС на имеющемся фонде скважин. По сути, это задача бинарной классификации, решаемая с помощью ИНС.

Другой задачей управления ГТМ являлась также задача разделения ГТМ на классы и выбора клас-

са (типа) ГТМ для каждой скважины-кандидата. Среди ГТМ выделено четыре класса (типа) мероприятий, обычно примерно в одинаковых пропорциях, проводимых на скважинах: ремонтно-изоляционные работы (РИР) – замена насосно-компрессорных труб, ликвидация межколонных давлений и перетоков; использование электроцентробежных насосов (ЭЦН) – перевод скважин на механизированный способ добычи, спуск ЭЦН, смена ЭЦН; ГРП; прочие мероприятия – ремонт наземного оборудования скважин, смена фонтанной арматуры или пакеров и т.п.

При решении многих задач нет заранее определённых критериев выбора гиперпараметров и архитектуры ИНС. Таким образом, по сути необходимо было провести экспериментальный поиск оптимальных архитектуры и гиперпараметров ИНС для решения поставленных задач классификации скважин и ГТМ.

Число скрытых слоёв ИНС прямого распространения выбиралось равным 2–20. Исследовалось также применение различных функций активации (Sigmoid, TanH, ReLU) и алгоритмов оптимизации при обучении ИНС (SGD, Adam, AdaGrad, AdaDelta), дающих лучшую сходимость при обучении [17]. Изменялась также скорость обучения: 0,2; 0,1; 0,05; 0,01; 0,005; 0,001. Также использовался слой Dropout с различными вероятностями [18].

Обучающая выборка формировалась на основе баз данных технологических и геологических параметров одного из нефтегазоконденсатных месторождений Томской области. Фонд скважин месторождения имеет 142 добывающие скважины, на которых было проведено 436 различных ГТМ за 6 лет.

По данным ряда геологических служб добывающих предприятий известно, что планирование ГТМ происходит не ранее чем за 4 месяца до его проведения. Более того, нет той чёткой границы, когда происходит переход скважины из одного класса в другой класс (из класса рентабельных в класс нерентабельных и требующих ГТМ). Чаще всего это происходит в процессе её эксплуатации от одного проведённого ГТМ до другого путём постепенного изменения значений параметров до критических. Поэтому средний интервал времени между моментами времени проведения соседних ГТМ на скважине разумно считать «сомнительным для принятия решения о необходимости ГТМ» и исключить его из рассмотрения. В общем случае такой интервал не симметричен относительно середины интервала времени эксплуатации скважины между выполненными на ней ГТМ. Экспериментально было установлено, что «сомнительный» интервал времени может составлять до 30% от интервалов времени между ГТМ. Это было учтено при формировании обучающей выборки для ИНС и оценке ее достаточного объёма.

Фонд скважин месторождения часто имеет относительно небольшое количество добывающих скважин, особенно если это месторождение эксплуатируется не так давно. Ещё меньше в таком фонде

тех скважин, которые подвергаются ГТМ в выбранный период времени. Учитывая это, предложено использовать аугментацию данных – методику создания дополнительных обучающих данных из имеющихся данных. Применялся один из основных методов аугментации – добавление к ряду значений вышеперечисленных параметров исходной обучающей выборки случайного шума [19].

Значения различных параметров скважин и продуктивных пластов измеряются в разных диапазонах, и для того чтобы каждый параметр оказывал влияние на конечный результат в экспериментах, осуществлялась нормализация данных [20]. Значения по каждому параметру были нормированы так, чтобы они находились в диапазоне [0, 1].

При исследовании важно понять, какое сочетание геологических и (или) технологических параметров содержит наиболее существенные признаки, которые может извлечь ИНС для решения поставленных задач классификации. Формировались следующие обучающие и тестовые наборы параметров, подаваемых на вход ИНС.

– Набор № 1 – все измеряемые параметры скважин и продуктивных пластов: Q_n ; Q_r ; Q_j ; Q_v ; $P_{заб}$; $P_{буф}$; $P_{зат}$; T_y ; D ; $P_{пл}$; $T_{пл}$; W ; H ; B .

– Набор № 2 – все технологические параметры скважин: Q_n ; Q_r ; Q_j ; Q_v ; $P_{заб}$; $P_{буф}$; $P_{зат}$; T_y ; B .

– Набор № 3 – параметры дебитов скважин: Q_n ; Q_r ; Q_j ; Q_v .

– Набор № 4 – технологические параметры скважин (без дебитов): $P_{заб}$; $P_{буф}$; $P_{зат}$; T_y ; B .

– Набор № 5 – параметры дебитов скважин и параметры продуктивных пластов: Q_n ; Q_r ; Q_j ; Q_v ; $P_{пл}$; $T_{пл}$.

– Значения параметров в общем случае измеряются в разное время для каждой конкретной скважины. Чтобы получить вектор всех значений на определённый момент времени, необходимо было интерполировать значения некоторых параметров по соседним имеющимся значениям.

Число обучающих и тестовых примеров, включая данные, полученные за счёт аугментации, составляет 2016 пар «признаки – метки» для каждого указанного выше обучающего и тестового набора. Объём обучающей выборки составляет 80% от общего используемого объёма данных набора. Точность классификации оценивалась для обучающей выборки и для тестовой выборки, составляющей 20% этого объёма данных. Под точностью классификации понимается отношение скважин, правильно отнесённых к заранее известному классу, к общему числу анализируемых скважин в обучающей и тестовой выборках (в процентах). Аналогично вычислялась точность классификации при выборе типа ГТМ.

Для программной реализации ИНС различной архитектуры и задания гиперпараметров ИНС использовалась библиотека Microsoft CNTK, имеющая ряд преимуществ перед другими библиотеками [21]. Схема архитектуры ИНС, приведённая в качестве примера, представлена на рис. 1. Она включает в

себя входной слой, куда подаются значения параметров из того или иного обучающего или тестового набора из пяти перечисленных, совокупность скрытых слоёв (показаны 3 слоя с функцией активации TanH) и выходной слой Softmax. Для предотвращения переобучения перед выходным слоем в ИНС использовался слой Dropout. Из рис. 1 видно, что ИНС в принципе позволяет решать одновременно обе задачи классификации. То есть в случае выбора скважины-кандидата для ГТМ на выходе нейросети имеется выбранный для неё тип ГТМ.



Рис. 1. Схема архитектуры ИНС

Для оценки соответствия используемым для обучения данным каждой из исследуемых архитектур ИНС с её гиперпараметрами применялась технология кроссвалидации. Использовался метод K -блоков, причем $K = 5$. Это означает, что все вычисленные в ходе исследований итоговые значения точности классификации скважин и типов ГТМ являются результатом усреднения по пяти значениям точности, полученным в ходе обучения и тестирования.

Результаты экспериментов и их анализ

В таблице приведены в качестве примера результаты экспериментов с ИНС различной архитектуры для набора № 2 при решении задачи классификации скважин-кандидатов для ГТМ. В экспериментах использованы четыре варианта алгоритмов оптимизации при обучении ИНС и для каждого из них – три варианта наиболее известных функций активации. Аналогичные эксперименты были проведены для наборов № 1, 3, 4 и 5 и результаты сведены в соответствующие четыре таблицы.

На рис. 2 приведены взятые из таблиц все лучшие результаты по точности классификации скважин для всех пяти наборов параметров в случае тестовых выборок. Они получены с помощью оптимизационных алгоритмов обучения Adam или SGD и функций активации TanH или ReLU.

Проанализируем полученные результаты. Видно, что основным фактором, влияющим на точность классификации, является различие архитектур ИНС, в первую очередь, по числу скрытых слоёв.

Функция активации Sigmoid для всех алгоритмов обучения и алгоритм оптимизации при обучении AdaDelta для всех функций активации не позволили получить высокую точность классификации скважин вследствие плохой обучаемости ИНС.

Результаты классификации скважин с использованием ИНС в случае набора № 2

Алгоритм обучения	Функция активации	Выборка	Точность классификации скважин, %											
			Число слоёв											
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	
SGD	Sigmoid	Обучающая	65,327	52,874	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
		Тестовая	64,205	52,092	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
	TanH	Обучающая	93,416	98,250	99,228	97,115	99,332	98,870	97,220	99,590	96,497	99,640	91,298	
		Тестовая	92,594	96,722	97,734	95,910	98,359	97,730	95,268	97,326	95,702	97,334	89,337	
	ReLU	Обучающая	94,853	98,148	98,765	98,970	99,127	97,323	99,333	99,024	98,095	98,971	94,539	
		Тестовая	93,019	96,305	97,134	97,334	97,947	96,709	97,534	97,938	97,746	95,893	92,827	
AdaGrad	Sigmoid	Обучающая	53,232	52,423	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	
		Тестовая	52,708	52,245	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	
	TanH	Обучающая	86,005	93,467	97,839	99,074	99,537	99,280	98,662	99,332	99,536	99,614	99,076	
		Тестовая	85,604	93,414	96,913	97,742	96,702	96,913	96,918	96,922	97,334	97,118	96,084	
	ReLU	Обучающая	49,692	47,737	56,995	51,594	50,566	46,912	50,051	50,671	46,135	52,881	50,000	
		Тестовая	49,800	47,938	57,198	51,641	50,629	47,326	50,208	51,433	46,327	53,291	50,000	
AdaDelta	Sigmoid	Обучающая	50,103	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	
		Тестовая	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	
	TanH	Обучающая	56,168	63,271	52,470	51,851	48,463	58,180	57,716	59,722	55,194	64,403	63,323	
		Тестовая	55,761	62,751	52,462	52,270	48,963	58,019	57,194	59,881	54,736	64,392	63,376	
	ReLU	Обучающая	52,830	62,447	61,058	61,266	66,716	60,495	60,805	61,575	58,537	70,113	75,670	
		Тестовая	52,474	61,505	60,697	61,101	66,471	60,068	60,276	61,922	58,027	69,116	74,881	
Adam	Sigmoid	Обучающая	84,158	89,760	96,039	82,665	81,662	73,243	71,504	55,132	51,751	50,825	50,000	
		Тестовая	83,529	89,107	93,831	79,821	80,672	70,391	69,575	54,362	51,637	50,816	50,000	
	TanH	Обучающая	99,794	99,640	98,508	99,383	99,846	99,537	99,279	98,256	96,393	51,388	51,540	
		Тестовая	97,126	98,563	96,922	97,942	98,767	97,530	97,334	96,909	95,710	51,442	51,247	
	ReLU	Обучающая	99,486	97,889	99,332	99,281	99,486	99,332	99,538	99,589	89,639	59,333	59,227	
		Тестовая	98,146	96,298	97,326	97,126	97,326	97,942	98,159	98,567	88,163	59,583	59,184	

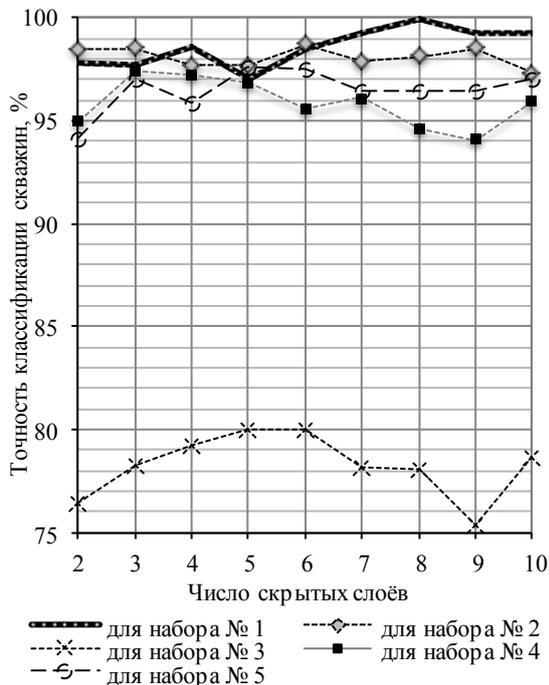


Рис. 2. Лучшие результаты по точности классификации скважин на тестовых выборках

Весьма низкие результаты наблюдаются при использовании в ИНС 2 или 3 скрытых слоёв для всех алгоритмов оптимизации, кроме алгоритма Adam. По-видимому, это связано с тем, что число извлекаемых в этих случаях признаков скважины для отнесения ее к тому или иному классу не соответствует сложности задачи. Для числа скрытых слоёв более 10 для этих же алгоритмов оптимизации

и функций активации результаты также невысоки. Из рис. 2 следует, что наилучшая точность для разного числа скрытых слоёв ИНС достигнута для набора № 1, а наихудшая – для набора № 3.

На практике для столь серьезного по финансовым затратам мероприятия, как остановка скважины и выполнение на ней того или иного ГТМ, важно иметь как можно большую точность классификации. Поэтому средняя точность классификации при обучении ИНС более 99% и средняя точность при её тестировании более 98% были выбраны как приемлемые для практического использования (см. таблицу, значения указаны жирным шрифтом). Выше таких пороговых значений точности находятся результаты, полученные на наборах № 1 и 2 с помощью оптимизационных алгоритмов Adam и SGD и функций активации TanH и ReLU. Остальные результаты не представляют практический интерес.

Все результаты по точности классификации скважин, приемлемые для практического использования, сравнивались по критерию Краскала-Уоллиса. Показано, что отличия в результатах при выборочных флуктуациях не являются существенными при уровне значимости, равном 0,05.

Так как разница в точности классификации скважин для указанных архитектур ИНС незначительна, на некоторых нефтегазодобывающих предприятиях могут отдать предпочтение наиболее простым моделям ИНС с точки зрения их архитектуры и числа параметров на входе. Например, архитектуре с тремя или даже с двумя скрытыми слоями и функцией активации TanH или ReLU. При этом на входе ИНС будет набор № 2 параметров, а обучение нейросети ведётся по алгоритму Adam. Это позволит

снизить требования к вычислительным ресурсам, необходимым для анализа технологических и геологических данных с помощью ИНС, а также минимизировать перечень параметров на входе нейросети и соответственно объем предварительной подготовки к анализу значений таких параметров.

Этот пример показывает, что полученные результаты исследования могут быть востребованы для разработки методики использования сложного аппарата глубоких ИНС при управлении ГТМ.

В экспериментах по определению точности классификации при выборе типа (класса) ГТМ на выявленных скважинах-кандидатах для ГТМ использовались архитектуры и гиперпараметры ИНС, а также обучающие и тестовые наборы данных, давшие наилучшие результаты по точности классификации скважин. В итоге для ИНС с 9 скрытыми слоями для алгоритма Adam и функции активации TanH в случае набора № 2 получена наилучшая точность классификации типов ГТМ при тестировании – 85%. Знание типа ГТМ позволит специалисту-геологу сузить область рассмотрения потенциально возможных ГТМ для скважины-кандидата и тем самым окажет ему поддержку в принятии решения по выбору ГТМ.

Заключение

Сегодня очевидно, что интеллектуальные технологии – главный фактор обеспечения оптимальных управленческих решений при эксплуатации фондов скважин месторождений УВС, в том числе при управлении ГТМ на этих фондах.

Проведены исследования эффективности глубоких ИНС прямого распространения при решении задач классификации при выборе скважин-кандидатов для проведения ГТМ и при выборе типа ГТМ для таких скважин. Наилучшие и практически приемлемые результаты по точности выбора скважин-кандидатов для ГТМ (более 98% на тестовых выборках) были достигнуты при подаче на вход ИНС полного набора всех измеряемых технологических и геологических параметров или набора всех технологических параметров скважины. При этом обучение ИНС велось с использованием оптимизационных алгоритмов Adam и SGD и функций активации ReLU и TanH. Наилучшая точность классификации типов ГТМ для скважин-кандидатов составила 85% на тестовых выборках.

Отметим, что полученные результаты исследований эффективности глубоких ИНС позволят создать методику использования ИНС при управлении ГТМ на месторождениях нефти и газа.

Литература

1. Марков Н.Г. Информационно-управляющие системы для газодобывающего производства. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-а, 2016. – 261 с.
2. Барбер Э. Оптимизация добычи: от продуктивного пласта до пункта подготовки нефти и газа / Э. Барбер, М.Е. Шиппен, С. Бару // Нефтегазовое обозрение. – 2008. – Т. 19, № 4. – С. 22–37.

3. Evsyutkin I. Intellectual information system for management of geological and technical arrangements during oil field exploitation / I. Evsyutkin, N. Markov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803: Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016): International Conference, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation. – [012093, 6 p.].

4. Березина А.А. Экономическая концепция нефтегазового «интеллектуального» месторождения / А.А. Березина, А.Е. Череповицын // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 14. – С. 14–15.

5. Редикульцев С.А. Использование метода нейронных сетей для прогноза параметров работы скважин после проведения ГРП / С.А. Редикульцев, А.В. Липлянин, А.О. Палий // Бурение, разработка, добыча. – 2010. – Т. 5, № 1. – С. 33–37.

6. Келлер Ю.А. Разработка искусственных нейронных сетей для предсказания технологической эффективности от выравнивания профиля приёмистости // Изв. Том. политехн. ун-та. Сер.: Информационные технологии. – 2014. – Т. 325, № 5. – С. 60–65.

7. Келлер Ю.А. Применение кластеризации данных на основе самоорганизующихся карт Кохонена при подборе скважин-кандидатов для методов увеличения нефтеотдачи // Управление, вычислительная техника и информатика: Вестник Том. гос. ун-та. – 2014. – Т. 28, № 3. – С. 32–37.

8. Кашапов А. Применение теории нечётких множеств для поиска скважин-кандидатов на проведение геолого-технических мероприятий // SPE International, Society of Petroleum Engineers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-176744-RU> (дата обращения: 15.01.2020).

9. Галиуллин М.М. Методика выбора скважин-кандидатов для интенсификации добычи с использованием математического аппарата нечёткой логики / М.М. Галиуллин, П.В. Зимин, В.В. Васильев // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 6. – С. 120–123.

10. Odedele T.O. Oil Well Performance Diagnosis System Using Fuzzy Logic Inference Models / T.O. Odedele, H.D. Ibrahim // Proceedings of The World Congress on Engineering. – 2014. – P. 80–85.

11. Okwu M.O. A review of fuzzy logic applications in petroleum exploration, production and distribution operations / M.O. Okwu, N.A. Nwachukwu // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2018. – Vol. 9. – P. 1555–1568.

12. Созыкин А.В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестник ЮУиГУ. Сер.: Вычислительная математика и информатика. – 2017. – Т. 6, № 3. – С. 28–59.

13. Azeroual O. Data Quality Measures and Data Cleansing for Research Information Systems / O. Azeroual, G. Saake, M. Abuosba // Journal of Digital Information Management. – 2018. – Vol. 16, No. 1. – P. 12–16.

14. Kofi Sarpong Adu-Manu A Review of Data Cleansing Concepts Achievable Goals and Limitations / Kofi Sarpong Adu-Manu, John Kingsley Arthur // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 7, No. 76. – P. 19–22.

15. Евсюткин И.В. Веб-сервис обнаружения и корректировки ошибок в данных на промыслах нефтегазодобывающих компаний / И.В. Евсюткин, Н.Г. Марков / Сб. науч. тр. XVI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии», Томск, 3–7 декабря 2018 г. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2019. – С. 231–232.

16. Коршак А.А. Основы нефтегазового дела: учебник для вузов. – 3-е изд., испр. и доп. / А.А. Коршак,

А.М. Шаммазов. – Уфа.: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2005. – 528 с.

17. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from overfitting / Nitish Srivastava, Geoffrey Hinton, Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Ruslan Salakhutdinov // *Journal of Machine Learning Research*. – 2014. – Vol. 15. – P. 1929–1958.

18. Darío Baptista Performance comparison of ANN training algorithms for classification / Darío Baptista, Sandy Rodrigues, F. Morgado-Dias // *Conference: Intelligent Signal Processing (WISP), 2013 IEEE 8th International Symposium*. – 2013. – P. 115–120.

19. Khandakar M. Times-series data augmentation and deep learning for construction equipment activity recognition / M. Rashid Khandakar, Joseph Louis // *Advanced Engineering Informatics*. – 2019. – Vol. 42. – Article 100935.

20. Han J. *Data Mining: Concepts and Techniques*, 3rd Edition / J. Han, M. Kamber, J. Pei. – Elsevier Science, 2011. – 744 p.

21. Shaohuai Shi Benchmarking State-of-the-Art Deep Learning Software Tools / Shaohuai Shi, Qiang Wang, Pengfei Xu, Xiaowen Chu // *arXiv:1608.07249v7 [cs. DC]* 17 Feb 2017. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1608.07249.pdf> (дата обращения: 15.01.2020).

Евсюткин Иван Викторович

Аспирант Отделения информационных технологий (ОИТ) Инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР)

Национального исследовательского

Томского политехнического университета (НИ ТПУ)

Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-923-425-12-09

Эл. почта: ive1@tpu.ru

Марков Николай Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор ОИТ ИШИТР НИ ТПУ

Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 70-16-09

Эл. почта: markovng@tpu.ru

Evsyutkin I.V., Markov N.G.

Management of geological and technical arrangements on oil-and-gas fields with the use of artificial neural networks

The timely selection of the wells to carry out the geological and technical arrangements (GTAs) and the selection of definite GTAs for such wells are crucial tasks for oil-and-gas extraction companies. Nowadays, these tasks are solved mainly using the wide experience and intuition of the specialist-geologist. Moreover, the decision process demands serious time contributions from a specialist and does not exclude the incorrect results bound with a human factor. Therefore, the development and deployment of new intellectual methods of the geological and technological data analysis for the management of GTAs are aimed in the research. In the article, the authors propose to use deep feed-forward neural networks when solving GTAs management problems. The results of complex efficiency evaluation for such neuron networks, which showed the potential of this method of intellectual data analysis for the GTAs management, are described.

Keywords: geological and technical arrangements on oil-and-gas fields, automation of the production, the intellectual analysis of data, artificial neural networks.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-62-69

References

1. Markov N.G. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy dlya gazodobyvayushchego proizvodstva* [Management of information systems for gas production]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2016, 261 p. (in Russ.)

2. Barber E., Shippen M.E., Barua S. [Extraction optimization: from productive formation to the point of oil-and-gas preparation]. *Oil and gas review*, 2008, vol. 19, no. 4, pp. 22–37 (in Russ.).

3. Evsyutkin I., Markov N. Intellectual information system for management of geological and technical arrangements during oil field exploitation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803: Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016): International Conference, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation [012093, 6 p.].

4. Berezina A.A., Cherepovitsyn A.E. [Economic concept of an oil-and-gas “intellectual” field]. *Oil industry*, 2014, no. 14, pp. 14–15 (in Russ.).

5. Redikultsev S.A., Lipyanin A.V., Paliy A.O. [Use of the method of neural networks for the forecast of parameters of work of wells after carrying out hydraulic fracturing of formation]. *Drilling, development, extraction*, 2010, vol. 5, no. 1, pp. 33–37 (in Russ.).

6. Keller Yu.A. [Development of artificial neural networks for the prediction of technological efficiency from conformance control]. *News of Tomsk Polytechnic University, Information technologies*, 2014, vol. 325, no. 5, pp. 60–65 (in Russ.).

7. Keller Yu.A. [Application of clustering of data based on the self-organizing Kohonen's cards at the selection of candidates-wells for methods of oil extraction increase] // *Control, computers, and informatics: News of Tomsk State University*, 2014, vol. 28, no. 3, pp. 32–37 (in Russ.).

8. Kashapov A. [Application of the fuzzy logic theory for the selection of candidates-wells for carrying out geological and technical arrangements]. *SPE International, Society of Petroleum Engineers*, 2015, SPE-176744-RU (in Russ.).

9. Galiullin M.M., Zimin P.V., Vasilyev V.V. [Approach of the selection of candidates-wells for an extraction intensification with the use of fuzzy logic]. *Oil industry*, 2011, no. 6, pp. 120–123 (in Russ.).

10. Odedele T.O., and Ibrahim H.D. Oil Well Performance Diagnosis System Using Fuzzy Logic Inference Models. *Proceedings of The World Congress on Engineering*, 2014, pp. 80–85.

11. Okwu M.O., Nwachukwu A.N. A review of fuzzy logic applications in petroleum exploration, production and distribution operations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018, vol. 9, pp. 1555–1568.

12. Sozykin A.V. [Review of methods for deep neural networks training]. *News of the Southern-Ural State University*, 2017, pp. 28–59 (in Russ.).

13. Azeroual O., Saake G., Abuosba M. Data Quality Measures and Data Cleansing for Research Information Systems. *Journal of Digital Information Management*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 12–16.

14. Kofi Sarpong Adu-Manu, John Kingsley Arthur A Review of Data Cleansing Concepts Achievable Goals and Limitations. *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 7, no. 76, pp. 19–22.

15. Evsyutkin I.V., Markov N.G. *Veb-servis obnaruzheniya i korrekcirovki oshibok v dannykh na promyslah neftegazodobyvayushchikh kompaniy* [Web-service of detection and correction of errors in the oil-and-gas extraction companies]. *V sbornike nauchnykh trudov XVI Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov, molodikh uchyonikh «Mo-*

lodyozh I sovremennyye informatsionnie tekhnologii» (Tomsk, 3-7 dekabrya 2018 g) [“Youth and modern information technologies” (Tomsk, 3–7 December 2018). Proc. of the XVI International scientific and practical conference of students, PhD students, young scientists]. Tomsk. Tomsk Polytechnic University Publ, 2019, pp. 231–232 (in Russ.)

16. Korshak A.A., Shammazov A.M. *Osnovy nefte-gazovogo dela. Uchebnik dlya vuzov* [Bases of the oil-and-gas industry: The educational book for higher education institutions]. Ufa. LLC «DizaynPoligrafServis» Publ., 2005, 528 p. (in Russ.)

17. Nitish Srivastava, Geoffrey Hinton, Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Ruslan Salakhutdinov Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 2014, vol. 15, pp. 1929–1958.

18. Dario Baptista, Sandy Rodrigues, F. Morgado-Dias Performance comparison of ANN training algorithms for classification. Conference: Intelligent Signal Processing (WISP), 2013 IEEE 8th International Symposium, 2013, pp. 115–120.

19. Khandakar M. Rashid, Joseph Louis Times-series data augmentation and deep learning for construction equipment activity recognition. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, vol. 42, Article 100935.

20. Han J., Kamber M., Pei J. *Data Mining: Concepts and Techniques*, 3rd Edition. Elsevier Science, 2011, 744 p.

21. Shaohuai Shi, Qiang Wang, Pengfei Xu, Xiaowen Chu Benchmarking State-of-the-Art Deep Learning Software Tools. arXiv:1608.07249v7 [cs.DC] 17 Feb. 2017. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1608.07249.pdf> (Accessed: January 15, 2020).

Ivan V. Evsyutkin

Post graduate student,
Department of Information Technologies,
School of Computer Science & Robotics,
National Research Tomsk Polytechnic University (NI TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-425-12-09
Email: ivel@tpu.ru

Nikolay G. Markov

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Department of Information Technologies,
School of Computer Science & Robotics, NI TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-16-09
Email: markovng@tpu.ru

УДК 528.87

М.Ю. Катаев, А.В. Кислов, Е.А. Самохин

Оценка состояния хвойных растений методами компьютерного зрения

Оценка экологии городской территории является сложным процессом, который связан с многочисленными пространственно-временными измерениями и определением разнообразных параметров почвы и воздуха. Однако такие измерения невозможно полностью назвать мониторинговыми, так как площадь даже среднего города достаточно большая и отследить можно только на регулярной основе лишь несколько точек. Нами предлагается подход, который является чувствительным к изменениям экологии воздуха и почвы и связан с изучением состояния хвойных растений. Хвойные растения круглый год являются зелеными, посажены во многих частях города и их RGB-изображения можно получать регулярно. Каждое изображение сегментируется с помощью индексов Greenness, и, проанализировав данные коэффициенты, можно оценить состояние растений. Состояние хвойного растения связано с изменением цвета (от зеленого к желтому). Описана программная система, использующая предложенные методы и алгоритмы. Приводятся результаты обработки реальных данных измерений, показывающих работоспособность предложенного подхода.

Ключевые слова: хвойное растение, программное обеспечение, кластеризация, вегетационный индекс, экология.
doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-70-75

Повышенная осведомленность людей (особенно экологов) об экологическом состоянии городской территории оказывает влияние на необходимость уделять этому аспекту больше внимания. Получение актуальной информации о степени загрязнения воздуха, почвы, городской экосистемы является существенной помощью для управления, а также процессом принятия решений.

Для контроля экологической ситуации территории городов применяются наземные измерительные системы и спутниковые многоспектральные изображения дистанционного зондирования. У каждого подхода есть свои преимущества и ограничения, которые определяют уровень современного исследования экологического состояния городской среды. Получаемая этими подходами информация обеспечивает представление об экологической ситуации в городе с определенным временным и пространственным разрешением.

Однако данные экологических служб не затрагивают всю городскую территорию и могут выступать лишь в качестве надежной информации по некоторым стационарным точкам. Спутниковая информация пока еще слабо используется для аналитических целей экологическими службами.

Одним из индикаторов качества экологического состояния является городская растительность. Изучая в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра изображения растительности, появляется возможность получать информацию о состоянии растительного покрова (в случае экологии – здоровое, больное). Получение изображений позволяет строить мониторинговые системы наблюдения за отдельными ареалами городской растительности практически во всех участках городской территории.

Надо отметить, что по изображению можно получить информацию о состоянии растения по всей его высоте, что позволяет оценивать не только изменение воздушной среды, когда нарушаются верхние

части растения, но и структуры почвы, которые отражаются на нижней части дерева (желтеют, нарушается структура кроны).

Для работы с изображениями применяются различные методы обработки и анализа, которые основаны на цветовых, текстурных или индексных характеристиках исследуемых объектов. Получение результатов обработки и анализа может быть автоматизировано, и любое отклонение от нормы может являться индикатором принятия того или иного решения. Естественно, что при этом возможна и визуальная интерпретация получаемых результатов. Автоматизация требует знания многих аспектов измерений, которые связаны с погодой, временем дня и года, сложностью сцены и типом цифровой камеры.

В данном исследовании предлагается на полученном изображении RGB выделить пиксели, которые связаны с хвойным растением, убрав пиксели фона (земля, небо, другие деревья и т.д.). Далее необходимо изучение состояния растительности с помощью индекса растительности. Данный индекс определяется из комбинации длин волн, связанных с RGB-каналами, и позволяет выделить растительность на изображении, а также оценивать ее состояние.

Далее задача связана с выделением зон изменения цвета пикселей от основного (выделение цветов пикселей, соответствующих хвойному растению, например, основная масса соответствует оттенкам зеленого – здоровое растение, возможны желтые и красноватые оттенки – больное растение). Эти изменения становятся индикаторами перемены экологического состояния. Кроме цветовых характеристик хвойных растений, экология влияет на плотность кроны дерева.

Таким образом, получая RGB-изображение дерева, например, один раз в день, и обрабатывая его, можно отслеживать изменения состояния хвойных растений, а значит, и экологическую ситуацию в данной части города.

Постановка задачи

Существующие методики дистанционного зондирования Земли позволяют измерять масштаб и биоразнообразие покрытых лесом территорий. Одним из подходов, на основе которого можно говорить о фенологических характеристиках леса, является вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [1], расчет которого проводится на основе красного спектрального канала и ближней ИК-области спектра. Чувствительность такого способа очень высока.

Однако результаты данного метода существенно зависят от наличия облачности в поле зрения спутникового прибора. Например, для территории Томской области безоблачных и частично облачных наблюдается всего около 100 дней, остальное же время связано с полным закрытием изучаемой области облаками [2]. Поэтому параллельно с методикой на основе NDVI развивается подход, в основе которого определяются характеристики зелени деревьев путем обработки RGB-изображений типовых цифровых камер (или веб-камер). Многоспектральные или гиперспектральные измерения являются чувствительными к индивидуальным особенностям отражения света от типов лесной растительности (лиственной и хвойной).

Цветные изображения RGB менее чувствительны к особенностям спектрального отражения света растениями, так как имеют достаточно широкие полосы спектральных каналов [3]. Это заставляет применять разнообразные методики из арсенала компьютерного зрения или выполнять разделение растительности вручную на изображениях RGB.

Нами предлагается подход, в основе которого лежит мониторинговое получение RGB-изображений определенной территории, где присутствуют хвойные растения. Хвойные растения нами выбраны ввиду того, что они являются весь год зелеными и позволяют детектировать их возможные изменения в зависимости от экологических особенностей расположения. Хвойные деревья реагируют на изменение внешних условий изменением цвета хвои достаточно быстро (несколько дней или недель). Последний аспект является важным для получения достаточно простого подхода к оценке экологической составляющей исследуемой области городской территории.

Цифровая обработка изображений

Многие типы многоспектральных изображений дистанционного зондирования обычно записываются в цифровом виде (HDF [https://www.hdfgroup.org], NetCDF [https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf], GeoTiff [http://geotiff.maptools.org], Jpeg2 [https://jpeg.org/jpeg2000]), а затем обрабатываются компьютерами для получения синтезированных или индексных изображений. В простейшей форме для проведения цифровой обработки изображений предварительно используются методики, которые включают этапы атмосферной и радиометрической коррекции. Далее применяют методики, которые уже выполняют функции сложных, как правило, итера-

ционных манипуляций с данными для получения сегментированных изображений, после чего решается задача классификации. В этом направлении опубликован ряд книг по теме обработки и интерпретации цифровых изображений [4, 5].

В таблице приведены основные возможности и ограничения для RGB изображений при изучении растительности [6–9].

Возможности мониторинговых измерений с помощью получения RGB-изображений

Характеристика	Возможности	Ограничения
Спектральные каналы	Ультрафиолетовые (УФ), {R,G,B}, Ближне-инфракрасные (БИК) и инфракрасные каналы (ИК)	Сложность получения изображений разных спектральных областей в одном поле зрения
Спектральное разрешение	Достаточно широкие спектральные {R, G, B} каналы (30–50 нм)	Существенное отличие каналов от типа цифровой камеры
Пространственное разрешение	Существенно зависит от расстояния до объекта и числа пикселей изображения	При удалении объекта от цифровой камеры действуют оптические эффекты (дисторсия [4, 5])
Временное разрешение	Возможности получить изображение с высокой частотой (несколько кадров в секунду)	Величина потока энергии, попадающей в объектив цифровой камеры, зависит от времени, что сказывается на качестве изображения. Необходимо применять особые методы обработки
Долгосрочный мониторинг	Ежедневные измерения с необходимой периодичностью в течение светового дня	Зависимость изображения объекта растительности от состояния погоды (дождь, туман, снегопад)

Любое изображение можно представить в виде двух областей, одну из которых занимает исследуемый объект, а другую фон, который необходимо выделить и удалить из изображения. Каждый пиксель изображения имеет числовое значение DN (Digital Numbers), которое представляет собой величину отражения или излучения от поверхности в различных участках спектра. Значение DN определяется спектральными свойствами отражения и поглощения каждого объекта на изображении, угловым положением Солнца, состоянием атмосферы и удаленности от цифровой камеры, а также спектральной чувствительностью каналов {R, G, B}.

Из таблицы можно увидеть, что использование RGB-изображений позволяет, с некоторыми ограничениями, использовать их для долговременных, мониторинговых измерений и получения необходимой информации после анализа результатов обработки.

Методы обработки изображений могут быть сгруппированы в три функциональные категории:

1. Предварительная обработка изображения, компенсирующая ошибки данных, шумы и геометрические искажения, возникающие во время записи изображения, а также занимающаяся исправлением изображения для атмосферного рассеяния.

2. Улучшение изображения путем использования методики «Серый мир», контрастного усиления, преобразования интенсивности, оттенка и насыщенности изображения.

3. Извлечение информации из изображения – кластеризация (сегментация), классификация, распознавание, обнаружение изменений и др. [6–12].

Предлагаемая методика

Использование вегетационного индекса NDVI для анализа состояний растений по спутниковым данным подразумевает, что для его расчета требуются спектральные каналы не только в видимой области, но и ближней инфракрасной области спектра. Однако цифровые спектральные камеры, которые реализуют такие измерения, являются достаточно дорогими, что затрудняет их широкое использование на практике. Нами предлагается использовать обычные цифровые RGB-камеры для получения изображений растительности, для которых разработаны индексы, являющиеся аналогом спутникового NDVI [13]. Одним из таких индексов является GCC (Green Chromatic Coordinate), который определяет числовое значение наличия зелени в данном пикселе. Существует несколько вариантов расчета этого индекса [14, 15]:

$$GCC1 = \text{Green}/\text{Sum}, \quad (1)$$

$$GCC2 = 2 \cdot \text{Red} - (\text{Blue} + \text{Green}), \quad (2)$$

$$GCC3 = (\text{Red} - \text{Blue})/(\text{Red} + \text{Blue}), \quad (3)$$

$$GCC4 = (\text{Blue} + \text{Green} - \text{Red})/\text{Sum}, \quad (4)$$

$$GCC5 = (2 \cdot \text{Red} - \text{Blue})/(2 \cdot \text{Red} + \text{Blue}), \quad (5)$$

где Red, Green, Blue – каналы RGB-цифровой камеры (красный, зеленый и синий) и $\text{Sum} = \text{Green} + \text{Blue} + \text{Red}$.

Опытным путем было установлено, что формула (5) наиболее чувствительна к наличию зелени растений на изображении, что позволяет с хорошей точностью выделить наличие растений на изображении. Надо заметить, что для другой цифровой камеры, где спектральные каналы RGB отличаются, наиболее чувствительной к зелени может быть другая формула. Перед тем, как выполнять расчет индексов GCC , нами выполнялась цветовая коррекция изображений по методике «Серый мир». Данный метод приводит к изменению цветового баланса каждого изображения относительно некоторого базового. Применение «Серого мира» помогает решить проблему разной освещенности в течение года, когда могут меняться погодные условия и угловое положение Солнца относительно горизонта. Методика заключается в последовательном применении формул:

$$Rs = \sum \sum \text{Red}(x, y), \quad (6)$$

$$Gs = \sum \sum \text{Green}(x, y), \quad (7)$$

$$Bs = \sum \sum \text{Blue}(x, y), \quad (8)$$

$$\text{AVG} = (Rs + Gs + Bs)/3, \quad (9)$$

$$Rn(x, y) = [\text{Red}(x, y) \cdot \text{AVG}]/Rs, \quad (10)$$

$$Gn(x, y) = [\text{Green}(x, y) \cdot \text{AVG}]/Gs, \quad (11)$$

$$Bn(x, y) = [\text{Blue}(x, y) \cdot \text{AVG}]/Bs, \quad (12)$$

где (Rs, Gs, Bs) – средние значения красного, зеленого и синего каналов RGB-изображения, AVG – средний серый цвет и (Rn, Gn, Bn) – измененные изображения.

После выполнения коррекции рассчитывается индекс GCC и происходит отделение хвойных растений на изображении от фона ($GCC > 0,3$). Так как положение растения фиксировано относительно камеры, возможно построить маску зелени выделенного растения, а остальные пиксели изображения не использовать для обработки. Для того чтобы отличать поврежденные участки растения, площадь маски разбивается на 6 частей относительно центра масс изображения. Таким образом, получаются две части в нижней, средней и верхней части растения. Это позволяет выделить место на растении, которое подверглось тому или иному воздействию, в том числе и экологическому. Так происходит каждый день и результатом является кривая поведения состояния растения, которая соответствует фенологическому циклу растения.

Полученные результаты

Для разработки программы работы с изображениями используется открытая библиотека алгоритмов компьютерного зрения OpenCV [16]. В основе этой библиотеки находятся разработки программного обеспечения Intel, и она содержит алгоритмы для: интерпретации изображений, калибровки камеры по эталону, устранения оптических искажений, определения сходства, анализа перемещения объекта, определения формы объекта и слежения за объектом, сегментации объекта и многие другие алгоритмы. Процесс получения изображения, его обработки и анализа можно представить в виде блок-схемы, представленной на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм получения и обработки изображения

На рис. 2 показана работа программы по обработке данных изображений системы измерений Phenocam (<http://phenocam.sr.unh.edu>) для станции,

расположенной в местности Oregon. Измерения RGB-изображений на этих станциях проводятся в течение всего года.

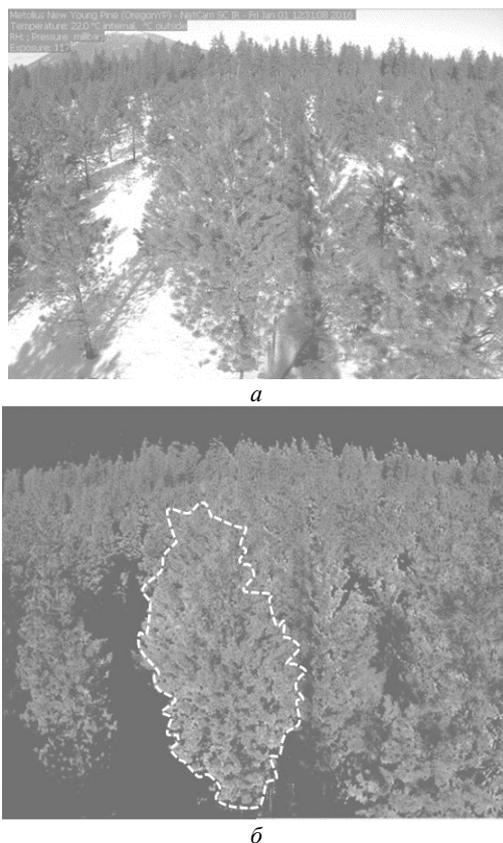


Рис. 2. Результат построения маски растений: а – исходное; б – преобразованное изображение

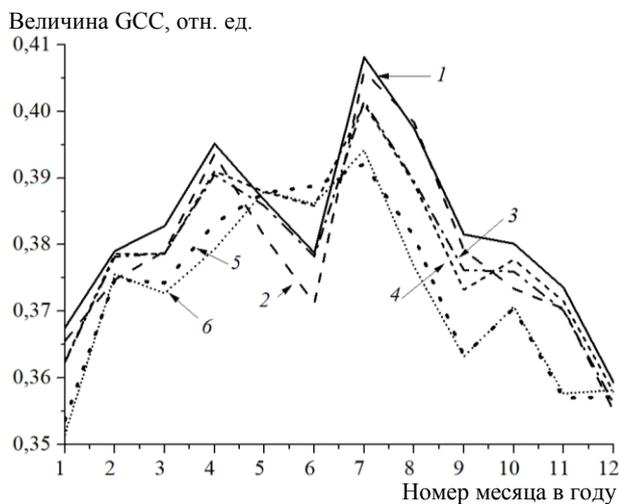


Рис. 3. Результат расчета суммарного GCC для шести частей выделенного хвойного растения за год

На рис. 2, а показано исходное изображение и на рис. 2, б – маска выделенной зелени (удален фон) и конкретное растение (белый пунктир). Для анализа из всех имеющихся изображений (348 за год) было выбрано 12, по одному из середины каждого месяца (15-е число). Для каждого из них был рассчитан индекс GCC для каждой из шести частей изображения хвойного растения.

Результат расчетов приведен на рис. 3, где цифрами и стрелками указаны номера частей на растении. Нумерация начинается с верхней части растения и слева направо.

Естественно, для получения более точных результатов нужно обработать изображения за каждый день, но в данной статье нами показывается принципиальная возможность анализа состояния хвойных растений по RGB-изображению.

Заключение

При выполнении работы, приведенной в статье, были решены задачи выбора вегетационного индекса GCC, построенного на основе RGB-каналов изображения и являющегося аналогом вегетационного индекса NDVI, получаемым с помощью многоспектральных спутниковых измерений. Для расчетов использованы мониторинговые измерения RGB-изображений для стационарной станции (Oregon Phenocam), в поле зрения которой находились хвойные растения.

Далее на основе открытой библиотеки компьютерного зрения OpenCV разработана программа обработки изображений. Программа включает этапы выделения хвойного растения на изображении, разбиения его площади на 6 частей и оценки вегетационного индекса GCC для изображений, сделанных в разное время года. Полученные результаты показывают, что в течение года наблюдается изменение вегетационного индекса в соответствии с известными в литературе закономерностями [10]. В дальнейших исследованиях планируется обработать все изображения каждого дня года для здорового хвойного растения и больного растения, у которого наблюдается изменение цвета хвои.

Литература

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 г. – М.: Росгидромет, 2017. – 70 с.
2. Черепанов А.С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 28–32.
3. Балалаев А.К. Предварительные результаты применения метода цифровой обработки изображения для определения проективного покрытия растительности как основного индикатора состояния экосистем / А.К. Балалаев, О.А. Скрипник // Экология и природопользование. – 2011. – № 14. – С. 114–123.
4. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Соифера. – М.: Физмалит, 2001. – 784 с.
5. Желтов С.Ю. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения / С.Ю. Желтов, Ю.В. Визильтер, А.В. Бондаренко и др. – М.: Физматкнига, 2010. – 689 с.
6. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.
7. Фомин В.В. Автоматизированная оценка состояния деревьев с использованием системы анализа изображений / В.В. Фомин, Д.С. Капралов, А.С. Попов, В.И. Крюк // Лесной журнал. – 2008. – № 1. – С. 24–30.
8. 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.

9. Барталев С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS / С.А. Барталев, В.А. Егоров, Д.В. Ершов, А.С. Исаев, Е.А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 4. – С. 285–302.

10. Козодеров В.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования / В.В. Козодеров, Т.В. Кондранин. – М.: МФТИ, 2008. – 222 с.

11. Малышева Н.В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. – М.: Моск. гос. ун-т леса, 2012. – 154 с.

12. 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.

13. Lebourgeois V. Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test / V. Lebourgeois, A. Begue, S. Labbe, B. Mallavan // Sensors. – 2008. – No. 8. – P. 7300–7322.

14. Ide R. Use of digital cameras for phenological observations / R. Ide, H. Oguma // Ecol. Inform. – 2010. – No. 5. – P. 339–347.

15. Катаев М.Ю. Методы технического зрения для картирования состояния сельскохозяйственных полей / М.Ю. Катаев, К.С. Ёлгин, И.Б. Сорокин // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 75–80.

16. Гарсия Г.Б. Обработка изображений с помощью OpenCV / Г.Б. Гарсия, О.Д. Суарес. – М.: ДМК-Пресс, 2016. – 210 с.

However, such measurements does not represent a pure monitoring, since the area of the average city is quite large and only a few points can be tracked on a regular basis. The article proposes an approach that is sensitive to changes that can occur in the of air and soil ecology and is associated with the study of the conifers' state. Conifers are green all year round, planted in many parts of the city and their RGB images are available on a regular basis. Each image can be segmented using Greenness indexes and then the state of the plants estimated from the analysis. The condition of the coniferous plant is associated with a color change (from green to yellow). A software system using the proposed methods and algorithms is described. The processing results of real measurement data showing the operability of the proposed approach is presented. **Keywords:** coniferous plant, software, clustering, vegetation index, ecology.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-70-75

References

1. Report on climate features in the Russian Federation for 2016. Moscow, Roshydromet, 2017, 70 p.

2. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetation indices. Geomatics. 2009, no. 3, pp. 28–32.

3. Balalaev A.K., Skrypnik O.A. Preliminary results of applying the digital image processing method to determine the projective cover of vegetation as the main indicator of ecosystem status Ecology and nature management. 2011, no. 14, pp. 114–123

4. Methods of computer image processing. M., Fismalit, 2001, 784 p.

5. Zheltov S.Yu., Vizilter Yu.V., Bondarenko A.V. Image Processing and Analysis in Machine Vision Problems. M., Fizmatkniga, 2010, 689 p.

6. Kozintsev V.I. Optoelectronic systems for environmental monitoring of the environment. M., Publishing House of MSTU N.E. Bauman, 2002, 528 p.

7. Fomin V.V., Kapralov D.S., Popov A.S., Hook V.I. Automated assessment of the state of trees using an image analysis system. Forest Journal, 2008, no. 1, pp. 24–30.

8. Kataev M.Yu, Skugarev A.A., Sorokin I.B. Possibilities of space monitoring for agricultural purposes of the Tomsk region. TUSUR reports, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 186–190.

9. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.A. Satellite mapping of the vegetation cover of Russia according to the MODIS spectroradiometer. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2011, vol. 8, no. 4, pp. 285–302.

10. Kozoderov V.V., Kondranin T.V. Methods for assessing the state of land cover according to the data of optical systems for remote aerospace sounding. Moscow, MIPT, 2008, 222 p.

11. Malysheva N.V. Automated interpretation of aerospace images of forest stands. Moscow, Mosk. state University of Forests, 2012, 154 p.

12. Kochubey S.M., Kobets N.I., Shadshina T.M. Spectral properties of plants as the basis of remote diagnostic methods. Kiev: Naukova Dumka, 1990, 136 p.

13. Lebourgeois V., Begue A., Labbe S., Mallavan B. Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test. Sensors. 2008, no. 8, pp. 7300–7322.

14. Ide R., Oguma H. Use of digital cameras for phenological observations. Ecol. Inform, 2010, no. 5, pp. 339–347.

15. Kataev M.Yu., Yolgin K.S., Sorokin I.B. Methods of technical vision for mapping the state of agricultural fields. TUSUR reports, vol. 21, no. 4, pp. 75–80.

16. Garcia G.B., Suarez O.D. Image processing using OpenCV. Moscow, DМК-Press, 2016, 210 p.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор
каф. автоматизированных систем управления (АСУ)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
40, Ленина пр-т, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Кислов Андрей Вячеславович

Студент каф. АСУ ТУСУРа
40, Ленина пр-т, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: andrei.kisloff@yandex.ru

Самохин Егор Александрович

Студент каф. АСУ ТУСУРа
40, Ленина пр-т, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: e.samokhin22@gmail.com

Kataev M.Yu., Kislov A.V., Samokhin E.A.

Estimation of coniferous plants state using computer vision methods

Evaluating the ecology of an urban area is a complex process that is associated with numerous spatial-temporal measurements and the specifying of various parameters of soil and air.

Mikhail Yu. Kataev

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Department of Automated Control Systems (ACS),
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru

Andrey V. Kislov

Student, Department ACS TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: andrei.kisloff@yandex.ru

Egor A. Samokhin

Student, Department ACS TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: e.samokhin22@gmail.com

УДК 378.374

А.М. Исаков, А.И. Исакова, А.М. Кориков

Формирование компетенций студентов на основе взаимодействия университета с работодателями

Обсуждаются проблемы перехода от знаниевой образовательной парадигмы к деятельностной (компетентностной) парадигме. Из многих проблем образования рассматриваются проблемы инженерного образования и возможности их разрешения на примерах подготовки кадров в области информатики, вычислительной техники (ИВТ) и информационных технологий (ИТ). Рассмотрены роль работодателя в повышении качества подготовки кадров в области ИВТ и ИТ, важные аспекты сотрудничества работодателя и вуза. Описан опыт взаимодействия кафедры АСУ ТУСУР с работодателями. Разработаны рекомендации по развитию сотрудничества системы образования, действующего производства, реального бизнеса и науки.

Ключевые слова: парадигма, компетенция, формирование компетенций, работодатель, сотрудничество вуза и фирмы, способы взаимодействия вуза и фирмы.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-76-81

Проблемы нашего века, обусловленные ухудшением состояния экосистем, сокращением природных ресурсов и сменой технологических укладов, привели к изменениям структуры занятости населения: исчезают старые профессии и появляются новые. Экономика развивается быстрыми темпами и требует ускорения подготовки кадров, способных решать все усложняющиеся задачи, но существует инертность системы образования, которую надо преодолевать для подготовки конкурентоспособных выпускников. Это одна из основных проблем системы высшего образования. Её решение возможно на основе системного подхода, объединяющего возможности, предоставляемые развитием вычислительной техники и цифровых технологий для организации учебного процесса в университете, и положительного опыта в области высшего образования, который имеется в университетах разных стран [1, 2]. Такая системная стратегия и взаимодействие с работодателями должны обеспечить синергию и устойчивость образовательной системы, возможность ее непрерывного совершенствования, соответствующего запросам цифровой экономики [3, 4].

Наш мир стремительно изменяется во всех сферах: в политике, в экономике, в культуре, в социальной сфере и т.п. Происходит и смена парадигм образования [5, 6]. Доминирующая ранее знаниевая парадигма трансформируется в компетентностную (деятельностную) парадигму. Смена парадигм символизирует кардинальные изменения в трактовке образования.

В старой парадигме это был процесс получения готового знания и было представление о педагоге как единственном источнике и носителе этого знания. В новой парадигме происходит отказ от этой трактовки образования: приходит осознание образования как средства самореализации личности.

В знаниевой парадигме учебный процесс центрируется вокруг педагога, а в деятельностной парадигме учебный процесс – это деятельность и самореализация обучаемого, т.е. образование концентрируется вокруг обучаемого [7] и содержит множество

источников знания и воспитания, в число которых входит и педагог. Сравнение обсуждаемых парадигм педагогики по основным компонентам представлено в [6]. При переходе к новой парадигме возникает проблемное месиво, которое требует новых подходов к решению проблем [5, 6, 8]. Нас интересуют проблемы технического образования по информатике, вычислительной технике (ИВТ) и информационным технологиям (ИТ). Исследуем эти проблемы на основе известных целей высшего образования (ВО) с учетом требований работодателей профильного кластера университета.

Необходимость интеграции обучения, науки и производства

Рассмотрим необходимость взаимодействия кафедр университета с работодателями, учитывая цели ВО в технических вузах. Цель обучения студентов по ИВТ и ИТ заключается в их подготовке к разработке новых информационных систем (ИС), обслуживанию ИС, совершенствованию ИС и развитию ИС. Уровень трудоустройства выпускников, их востребованность на рынке труда являются показателем эффективности и жизнеспособности университета.

В этой связи необходимость взаимодействия кафедр университета с работодателями и, соответственно, необходимость интеграции обучения, науки и производства становится очевидной. Очевидно также то, что работодатели заинтересованы в трудоустройстве выпускников, которые способны создавать конкурентоспособную продукцию.

Требования к конкурентоспособности важны для любых технических систем (ТС) [9]. В жизненном цикле ТС отмечают четыре периода: научные исследования по использованию, совершенствованию и развитию ТС конкретного типа; проектирование ТС; производство ТС; маркетинг и сопровождение ТС. Из литературы известны следующие проценты по трудоустройству выпускников технических университетов по видам деятельности: проектированием ТС занимаются более 50% выпускников; маркетингом, обслуживанием и ремонтом ТС – около 20%; производством ТС – примерно 15%; в

науке и образовании занято также примерно 15% выпускников. Из этих процентов следует, что в перспективе выпускники технических университетов в основном будут заниматься проектированием. Поэтому основное внимание в процессе обучения в техническом университете должно уделяться проектированию, так как это – основной вид будущей деятельности выпускников.

Знания, используемые профессионалами при проектировании, условно делят на четыре типа [10]: ПЗ – профессиональные знания, умения и навыки, которыми обладают профессионалы и которые базируются на их практическом опыте в конкретном виде деятельности; НЗ – знания, умения и навыки, которые можно объяснить словами «делай, как я»; ВЗ – вербальные знания; ФЗ – формализованные знания. В цитируемой книге [10] приводятся проценты по использованию отмеченных знаний: ФЗ представляют всего 1–2% от объема знаний, используемых профессионалами при проектировании; ВЗ составляют 3–4% от общего объема знаний; НЗ достигают 10% от общего объема знаний; ПЗ представляют собой основной объем профессиональных знаний. Перечисленные проценты относятся как к проектной работе, так и к другим видам трудовой деятельности. Очевидно, что ПЗ можно приобрести только на основе практической работы в конкретном, определенном виде совместной деятельности с профессионалами в сфере ИС. Поэтому необходимость в интеграции обучения, науки и производства вполне очевидна. Интеграция предполагает их органическое соединение в процессе обучения студента и формирования его компетенций по избранной специальности. Формирование компетенций студентов в области ИВТ и ИТ на основе этой интеграции рассмотрим на примерах экспериментального исследования, выполненного на кафедре АСУ ТУСУР.

Опыт интеграции вуза и работодателей на кафедре АСУ

Многие годы преподаватели кафедры АСУ ТУСУР активно сотрудничают с производственными предприятиями г. Томска, научно-исследовательскими институтами (НИИ), фирмами, бывшими выпускниками, привлекая их в роли работодателей и активных участников учебного процесса вуза.

Ежегодно преподаватели кафедры АСУ, отвечающие за работу с дипломниками и выпускниками, проводят опрос-анкетирование работодателей (производственные предприятия, НИИ, более 30 фирм г. Томска) по качеству профессиональной подготовки выпускников. Большинство работодателей отмечают высокий уровень подготовки наших выпускников.

На кафедре АСУ много лет проводятся научные семинары, на которые приглашаются представители работодателей. Также на заседания кафедры, посвященные вопросам обсуждения содержания рабочих учебных планов по преподаванию специальных дисциплин, практической подготовке студентов и трудоустройству выпускников, приглашают пред-

ставителей научных центров, НИИ, промышленных предприятий, бизнес-структур и др.

Опрос работодателей каф. АСУ показал, что для них важны следующие качества выпускника: способность работать в команде – 80,6%; уровень практических умений – 66,7%; готовность к дальнейшему обучению – 57,1%; уровень профессиональной подготовки – 47,2%, навыки работы на компьютере – 27,8%, эрудированность – 27,8% и др. (рис. 1).

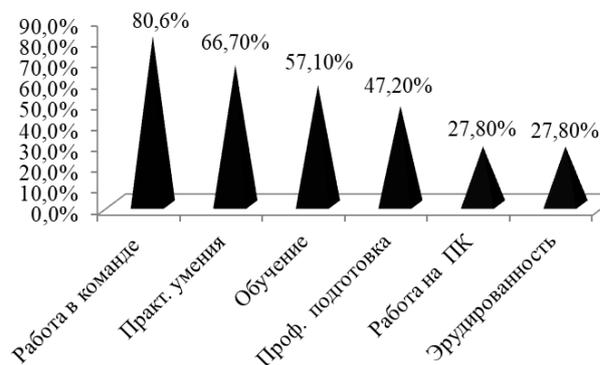


Рис. 1. Качества выпускника, влияющие на эффективность его профессиональной деятельности

Преподавателями каф. АСУ также проводилось анкетирование всех выпускников по вопросам оценки их перспектив на рынке труда по направлениям подготовки в области ИВТ и ИТ.

Анализ анкет ответов студентов показал, что большая часть выпускников надеются на ближайшее их трудоустройство по специальности – 68%, хотя меньше половины опрошенных согласны работать не по специальности (при условии высокого заработка) – 37%. Некоторые из студентов – 18% согласны работать в любом месте, куда смогут устроиться, и только 4,0% опрошенных не уверены в трудоустройстве на работу в ближайшее время после получения диплома. Из анкет видно, что большинство студентов не выражают особого волнения по поводу их успешного трудоустройства.

Часто на каф. АСУ и в целом в ТУСУР поступают заявки от крупных предприятий на предмет трудоустройства студентов на различные практики и на работу. Большинство студентов после прохождения производственных практик трудоустраиваются на эти предприятия на неполный рабочий день. В дневниках студентов работодатели часто пишут благодарственные отзывы о студентах.

Способы взаимодействия образования, науки и производства

Анализ существующих способов взаимодействия образования, производства и науки выявил некоторые необходимые условия эффективной интеграции [4]:

- более плотная связь ее структурных составляющих;
- выполнение условий требований всех субъектов интегративного взаимодействия образования, науки и производства;

– встроенность интеграции образования науки и производства в содержание подготовки будущих специалистов в отрасли ИВТ и ИТ.

Из нашего опыта взаимодействия с работодателями, заинтересованными в наборе квалифицированных молодых специалистов, их можно разделить на несколько категорий (рис. 2).



Рис. 2. Категории работодателей, заинтересованных в наборе квалифицированных специалистов

Наш комментарий по рис. 2 следует далее.

1. Проведение PR-компаний, обещающая карьерный рост. В эту категорию входят томские фирмы, представители которых приходят каждый год во время семестра на встречи со студентами и приглашают их прямо со студенческой скамьи приходить к ним для прохождения производственных практик, выполнения ВКР, участвуют в вузовских ярмарках вакансий, проводят презентации (PR-компании), всячески рекламируют себя, обещающая карьерный рост и высокую зарплату. Примеры таких фирм:

- *Первый БИТ* – специализируется на разработке прикладных решений для учета и управления в ИС (руководитель Юрий Валерьевич Нимиткин – выпускник каф. АСУ, частый гость с PR-компаниями среди аудиторий дипломников).

- *Компания Elecard* является разработчиком мультимедийных продуктов для обработки цифрового видео и аудио (директор компании «Elecard» (Томск) Николай Владимирович Милованов).

- *Компания АйТи* – специализируется на разработке лучшей платформы для e-commerce (директор Константин Шелковников – выпускник кафедры АСУ).

2. Активное участие в процессе обучения студентов. Многие компании принимают активное участие в жизни вуза, процессе обучения и подготовки студентов. Сотрудники этих компаний проводят занятия со студентами, обучая их своим программным продуктам, выдавая соответствующие сертификаты (например, компании «Консультант», «Гарант»). Примеры таких фирм:

- *Компания «КонсультантПлюс»* является разработчиком справочной правовой системы.

- *КонсультантПлюс* (председатель совета директоров компании «КонсультантПлюс» Д.Б. Новиков).

- *Компания «ЭлеСи»*, используя корпоративные знания, создает и внедряет системы управления объектами (генеральный директор Сергей Владимирович Чириков – выпускник кафедры АСУ).

- *ООО «Контек-Софт»* предлагает широкий спектр услуг по разработке программного обеспечения и ИТ-решений: бизнес-приложения; хранилище данных; проектирование баз данных, проектов и управление ими и др. (генеральный директор Владимир Николаевич Соснин – выпускник каф. АСУ, ведет на кафедре дисциплину «Современные принципы управления проектными ИТ-командами»).

3. Проведение научно-технических исследований. Многие научные центры, НИИ и предприятия нуждаются в проведении научно-технических исследований, для выполнения которых привлекают студентов и преподавателей. В таком единстве присутствует заинтересованность каждой из взаимодействующих сторон в поиске новых. Обычно такие научно-исследовательские задачи являются разовыми заказами, однако, участвуя в них, студенты (как правило, выполняют ВКР или магистерскую диссертацию) получают реальную возможность хорошо зарекомендовать себя на предприятии и в дальнейшем получить приглашение на постоянную работу. Примеры таких организаций:

- *Институт оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН)*. Основным направлением деятельности института является проведение научных исследований в области атмосферной оптики, а также разработка программного и информационного обеспечения для этих исследований (директор института – Игорь Васильевич Пташник, д.ф.-м.н.).

Б.А. Воронин, ст.н.с., к.ф.-м.н.; А.В. Афонасенко, н.с., к.т.н.; А.Я. Суханов, с.н.с., к.т.н., и другие сотрудники ИОА СО РАН ведут занятия по многим дисциплинам на каф. АСУ, руководят ВКР и магистерскими диссертациями, вместе со студентами активно участвуют в НИР кафедры, активно привлекает студентов к публикационной деятельности.

- *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН*. Основные направления деятельности института – мониторинг климатических и экосистемных изменений под воздействием природных факторов (директор института Евгения Александровна Головацкая, профессор РАН, в.н.с.).

С.Ю. Золотов, научный сотрудник Института, к.т.н., является членом ГАК по направлению 09.03.03 «Прикладная информатика», ведет занятия по нескольким дисциплинам бакалавриата и магистратуры на каф. АСУ, руководит курсовыми проектами и ВКР, привлекает студентов к участию в научных конференциях.

4. Участие в жизни вуза производственных предприятий.

- *ООО «Электрозавод»* имеет долгосрочные партнерские связи с каф. АСУ. Основной вид деятельности – оптовая торговля машинами, приборами, аппаратурой и оборудованием общепромышленного и специального назначения (директор Елена Сергеевна Лагерева).

- *ОАО Региональный деловой центр Томской области (ОАО РДЦ ТО)* осуществляет свою деятельность в сфере оптовых поставок топлива по

Томской области. Ряд ключевых сотрудников являются выпускниками каф. АСУ (зам. генерального директора по финансам А.Н. Хвощевский – выпускник кафедры АСУ, является членом ГАК по магистратуре 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника», «Автоматизированные системы обработки информации и управления в экономике»).

• *ОАО «Манотомь»* – это современное промышленное предприятие с полным производственным циклом по выпуску механических и цифровых манометров, а также комплектов оборудования для автоматизированных рабочих мест поверителей средств измерения давления (генеральный директор А.Ю. Гетц).

С.М. Алферов, к.т.н., инженер-программист ОАО «Манотомь», работает на каф. АСУ, преподает несколько дисциплин, руководит производственной практикой и ВКР у бакалавров по направлению 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», предлагая им тематику предприятия ОАО «Манотомь».

5. Участие в вузовских ярмарках вакансий. Ярмарки вакансии, которые проводят вузы и центры занятости, – весьма эффективный метод поиска сотрудников. Для работодателя это возможность без особых финансовых затрат пообщаться с большим числом соискателей, сформировать банк данных квалифицированных кандидатов и нужным образом представить себя на рынке труда региона [14].

6. Развитие сотрудничества вуза и работодателей. Исходя из опыта сотрудничества работодателя и вуза, можно предложить следующие формы дальнейшего взаимодействия.

Во-первых, в рамках часа куратора и проведения дисциплины «Введение в специальность» устраивать встречи с бывшими выпускниками кафедры (потенциальными работодателями), работающими по специальности ИВТ и ИТ, на которой обучаются студенты. Они рассказывают студентам о своем предприятии, делятся практическим опытом, обращают внимание на наиболее важные дисциплины в их учебе, отвечают на возникающие вопросы. Это будет мотивировать студентов первых курсов к желанию лучше учиться.

Во-вторых, уровень образования студента и учет его интересов будет повышаться во время проведения экскурсий для студентов на те предприятия, в адрес которых студенты высказывают свои пожелания о прохождении производственных практик и дальнейшем трудоустройстве в них. Например, в декабре 2019 г. в экскурсии на ОАО «Манотомь» студенты кафедры АСУ ознакомились с производственным процессом на ОАО, посетили музей и пообщались с представителями предприятия.

В-третьих, преподаватели кафедры, отвечающие за дипломирование, и руководители ВКР должны помогать своим выпускникам в их дальнейшем трудоустройстве, предоставляя им варианты трудоустройства в различных организациях.

Заключение

Анализ сотрудничества системы образования, действующего производства, реального бизнеса и науки показал, что исследованное взаимодействие:

- обеспечивает университету целевой заказ на подготовку востребованных специалистов, а работодателю – возможность на базе университета подготовить высококвалифицированный персонал;
- гарантирует выпускникам университета работу по специальности ИВТ и ИТ с надежной перспективой трудовой карьеры;
- обеспечивает профессиональный рост как преподавателей университета, так и студентов;
- формирует профессиональные компетенции выпускников.

Переход от знаниевой образовательной парадигмы к деятельностной парадигме обсуждается в отечественной педагогике не менее 50 лет [5, 15], но, как отмечается в [5], российские авторы отдают приоритет по этой теме зарубежным исследованиям, наблюдается стремительная американизация российской педагогики, как всегда – «нет пророков в своем отечестве». В нашей истории имеется много примеров успешного сотрудничества системы образования, науки, техники и производства (см., например, [16]) и подготовки на этой основе конкурентоспособных кадров.

Литература

1. Катаев М.Ю. Концепция электронного образования на основе технологии Avatar / М.Ю. Катаев, А.М. Кориков, В.С. Мкртчян // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 2(28). – С. 95–100.
2. Буймов А.Г. Введение в проблему освоения студентами исследовательских компетенций // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 75–81.
3. Кориков А.М. О подготовке конкурентоспособных ИТ-кадров // Современные тенденции развития непрерывного образования: вызовы цифровой экономики: матер. междунар. науч.-метод. конф., 30–31 января 2020 г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2020. – С. 137–138.
4. Исакова А.И. Трудоустройство выпускников вуза как критерий качества подготовки специалистов / А.И. Исакова, А.М. Исаков // Современные тенденции развития непрерывного образования: вызовы цифровой экономики: матер. междунар. науч.-метод. конф., 30–31 января 2020 г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – С. 153–154.
5. Новиков А.М. Основания педагогики: пособие для авторов учебников и преподавателей педагогики. – М.: Эгвес, 2010. – 208 с.
6. Кориков А.М. Парадигмы образования и роль теории управления в создании образовательных технологий // Современное образование: проблемы обеспечения качества подготовки специалистов в условиях перехода к многоуровневой системе высшего образования: матер. междунар. науч.-метод. конф., 2–3 февраля 2012 г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2012. – С. 127–128.
7. Woolf В.Р. Building Intelligent Interactive Tutors: Student – centered strategies for revolutionizing e-learning. – Burlington (USA): Morgan Kauffman Publishers, 2009. – 467 p.

8. Кориков А.М. Развитие технологий электронного образования с позиций информатики как науки об инфокоммуникациях / А.М. Кориков, А.А. Мицель, В.В. Романенко // Информатика и образование. – 2010. – № 8. – С. 40–46.

9. Бабко Л.В. Подход к разработке и содержанию магистерской программы по направлению «Управление в технических системах» / Л.В. Бабко, В.Ф. Мелехин // Матер. конф. «Информационные технологии в управлении» (ИТУ–2012). – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2012. – С. 836–842.

10. Громов Г.Р. От гиперкниги к гипермозгу: информационные технологии эпохи Интернета. Эссе, диалоги, очерки. – М.: Радио и связь, 2004. – 208 с.

11. Вадова Л.Ю. Система взаимодействия вуза и работодателей в подготовке будущих специалистов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 5-2. – С. 311–315.

12. Послание Президента Российской Федерации Федеральному Собранию от 12 декабря 2013 г. // Российская газета. – 2013. – № 6258 от 13 дек.

13. Малышева А.А., Невраева И.В. Компетенции молодых выпускников вузов глазами работодателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompetentsii-molodyh-vypusknikov-vuzov-glazami-rabotodateley>, свободный (дата обращения: 20.02.20).

14. Официальный сайт ТУСУРа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cstv.tusur.ru/ru/novosti/prosmotr/-/novost-v-tusure-bolee-2-000-tysyach-studentov-uznali-kak-postroit-svoyu-karieru>, свободный (дата обращения: 24.02.2020).

15. Милерян Е.А. Психология формирования общетрудовых политехнических умений. – М.: Педагогика, 1973. – 299 с.

16. Кориков А.М. Покоритель вершин науки и техники: к 85-летию Владимира Петровича Тарасенко // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 119–124.

Исаков Александр Михайлович

Ассистент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-404-10-50
Эл. Почта: alexis983@yandex.ru

Исакова Анна Ивановна

Доцент каф. АСУ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-408-53-88
Эл. почта: iai2@yandex.ru

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

Isakov A.M., Isakova A.I., Korikov A.M.

Developing students' competencies by interaction between the university and employers

The issues of transition from a knowledge-based educational paradigm to an activity (competency) paradigm are discussed. Out of many challenges that education faces, the problems in

engineering education and the ways to solve them are examined using examples of training engineers in computer science, computer technology (ICT) and information technology (IT). In this regard, the role of the employer in improving the quality of training in the field of ICT and IT is considered, being an important aspect of cooperation between the employer and the university. The case of interaction of the Department of Automated Control Systems of TUSUR with employers is described. Some recommendations have been proposed for more efficient cooperation between the education system, industry, and real companies and research units.

Keywords: paradigm, competence, development of competencies, computer science, computer technology, employer, cooperation between university and company, university-company interaction scenarios.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-76-81

References

1. Kataev M.Yu, Korikov A.M., Mkrtychyan V.S. [The Concept of electronic education based on Avatar technology]. *Proceedings of TUSUR University*, 2013, no. 2(28), pp. 95–100 (in Russ.).
2. Buymov A. [Introduction to the problem of students' development of research competencies]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 75–81 (in Russ.).
3. Korikov A. *On the training of competitive it personnel*. Current trends in the development of continuing education: challenges of the digital economy. Proc. of the international conference the scientific method. January 30-31, 2020, Tomsk, Russia. Tomsk, TUSUR publ., 2020, pp. 137–138 (in Russ.).
4. Isakova A.I., Isakov A.M. *Employment of University graduates as a criterion for the quality of training*. Current trends in the development of continuing education: challenges of the digital economy. Proc of the international conference. the scientific method. January 30-31, 2020, Tomsk, Russia. Tomsk, TUSUR publ., 2020, pp. 153–154 (in Russ.).
5. Novikov A.M. *The Foundation of pedagogy: a manual for authors of textbooks and teachers' pedagogy*. Moscow, Egues, 2010. 208 p. (in Russ.).
6. Korikov A.M. [Paradigms of education and the role of management theory in the creation of educational technologies]. Modern education: problems of ensuring the quality of training of specialists in the transition to a multi-level system of higher education. Materials of international research. science-method. conf., February 2–3, 2012, Russia, Tomsk. Tomsk, TUSUR publ., 2012, pp. 27–128 (in Russ.).
7. Woolf B. *Building Intelligent Interactive Tutors: Student-centered strategies for revolutionizing e-learning*. Burlington (USA), Morgan Kauffman Publishers, 2009. 467 p.
8. Korikov A.M., Mitsel A.A., Romanenko V.V. [Development of e-education technologies from the position of Informatics as a science of Infocommunications]. *Informatics and education*, 2010, no. 8, pp. 40–46 (in Russ.).
9. Babko L.V., Melekhin V.F. [Approach to the development and content of the master's program in the direction of «Management in technical systems»]. Proc. of the conference «Information technologies in management» (ITU–2012). SPb., SSC of the Russian Federation «Concern «Central research Institute «Electropribor», 2012, pp. 836–842 (in Russ.).
10. Gromov G.R. [From hyperbook to hyperbrain: information technologies of the Internet age. Essay, dialogues, essays]. Moscow, Radio and communications, 2004, 208 p. (in Russ.).
11. Vadova L.Yu. [System of interaction between the University and employers in the training of future specialists].

International journal of applied and fundamental research, 2016, no. 5-2, pp. 311–315 (in Russ.).

12. [Message of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly on December 12, 2013]. *Rossiyskaya Gazeta*, 2013, no. 6258 of December 13 (in Russ.).

13. Malysheva A.A, Nevraeva I.V. [Competence of young University graduates through the eyes of employers]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompetentsii-molodyh-vypusnikov-vuzov-glazami-rabotodateley> (Accessed: February 20, 2020) (in Russ.).

14. [Official website of TUSUR] (in Russ.). Available at: <https://cstv.tusur.ru/novosti/prosmotr/-/novost-v-tusure-bolee-2-000-tysyach-studentov-uznali-kak-postroit-svoyu-karieru>, free (Accessed: February 24, 2020) (in Russ.).

15. Myleran E.A. [Psychology of the formation of seredovich Polytechnic skills]. Moscow, Pedagogika, 1973. 299 p. (in Russ.).

16. Korikov A.M. [Conqueror of the peaks of science and technology: to the 85th anniversary of Vladimir Petrovich Tarasenko]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 119–124 (in Russ.).

Alexander M. Isakov

Assistant of Automated Control Systems Department (ACS) Tomsk State University of Control System and Radio Electronics Tomsk (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050; Phone: +7-923-404-10-50 Email: alexis983@yandex.ru

Anna I. Isakova

Associate Professor, Department of ACS TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050 Phone: +7-923-408-53-88 Email: iai2@yandex.ru

Anatoly M. Korikov

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of ACS 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

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК. 621.311.6

Ю.А. Андреев, С.Ю. Буров, Ю.А. Кремзуков

Проблемы защиты системы электроснабжения космических аппаратов от короткого замыкания при наземных испытаниях

Предлагается схемное и конструктивное решение быстродействующего блока защиты от коротких замыканий в цепях питания космического аппарата с аккумуляторной и солнечной батареями для предотвращения выхода из строя электронной аппаратуры.

Ключевые слова: короткое замыкание, аккумуляторная батарея, солнечная батарея, космическая аппаратура, наземные испытания, транзисторный двунаправленный ключ, MOSFEET.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-85-91

Система электроснабжения (СЭС) является одной из важнейших бортовых систем, обеспечивающих функционирование автоматических космических аппаратов (КА). СЭС представляет собой совокупность первичных и вторичных источников тока и комплекса автоматики, стабилизации и защиты.

Современные мировые тенденции развития перспективных КА направлены на увеличение эффективности, совершенствование служебных систем и ресурса бортовой аппаратуры и КА в целом. В связи с этим большое внимание уделяется СЭС КА, любые сбои в работе которой приводят к нарушению других систем, а при ее отказе – к завершению срока активного существования КА.

Основной задачей при построении СЭС КА является совершенствование характеристик силовой энергопреобразующей аппаратуры, а именно: улучшение удельных массогабаритных показателей, повышение надежности и долговечности. Для подтверждения заявленных параметров СЭС подвергается испытаниям на всех этапах – от экспериментальной отработки до комплексных испытаний КА. Наземные испытания космических аппаратов и их служебных систем, в том числе испытания энергопреобразующей аппаратуры СЭС на всех этапах производства, являются важной задачей создания высококачественной космической техники на предприятиях ракетно-космической отрасли [1–3].

Наземные испытания КА состоят из нескольких этапов: электрорадиотехнические испытания, интеграционные испытания, испытания на внешние воздействия, испытания после внешних воздействий, приемоиспытания КА.

При наземных испытаниях КА нарушение функционирования какого-либо электрического оборудования или внешнее механическое воздействие на кабельную сеть может привести к возникновению короткого замыкания (КЗ), а в некоторых случаях и возникновению пожара. Особо опасным является КЗ шин питания, идущих непосредственно от аккумуляторной батареи.

Также имеются случаи, когда в результате неопытности или невнимательности при монтаже без снятия напряжения допускались ошибки, приводившие к КЗ.

В силу различных причин такие КЗ могут возникать и при испытаниях КА внутри термобарокамеры (ТБК). В этом случае оперативно «потушить пожар» не представляется возможным. В мировой практике имеются случаи, когда в такой ситуации реально были «потеряны» готовые КА.

В связи с возрастающей энерговооруженностью КА увеличиваются, соответственно, энергетические характеристики аккумуляторных и солнечных батарей и в соответствии с этим возрастают токи короткого замыкания при их возникновении. Минимальные значения активного сопротивления питающих кабелей и их индуктивностей приводят к быстрому нарастанию тока короткого замыкания до предельных величин. На рис. 1 приведен пример экспериментального графика развития тока КЗ для аккумуляторной батареи (АБ) с активным сопротивлением кабеля около 40 мОм и индуктивностью около 10 мкГн.

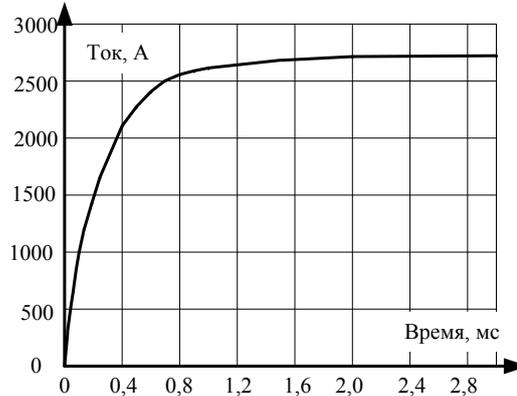


Рис. 1. Изменение тока в цепи АБ при КЗ

Динамика нарастания тока в начальный момент времени определяется в основном индуктивной составляющей нагрузки [4, 5]. Примерная оценка нарастания тока в начальный момент времени возникновения КЗ по приведенному графику подтверждает актуальность задачи поиска решения быстродействующей защиты от КЗ.

Термическая стойкость и сечение шин питания и отдельных проводников обычно рассчитываются с использованием формулы, известной как интеграл Джоуля для импульсного тока, который определяет

количество энергии, выделяющейся в проводнике при протекании электрического тока. Однако при этом нужно учитывать, что увеличение сечения проводников ведет к увеличению веса космического аппарата, что является ограничивающим фактором. Поэтому при таких расчетах не всегда удается полностью обеспечить защиту от любых КЗ, особенно от КЗ, происходящих в цепях, находящихся в непосредственной близости от АБ.

Для защиты от КЗ промышленность предлагает различные автоматические выключатели для цепей переменного и постоянного тока, начиная от простейших тепловых до использующих эффект сверхпроводимости [6–15], появившихся на рынке в последнее время. Минимально достижимое время срабатывания таких выключателей составляет десятки миллисекунд, а для большой перегрузки по току от 3–5 мс [16]. Однако для защиты цепей электронных схем микропроцессорных измерительных и управляющих устройств современных КА такого быстрого срабатывания защиты явно недостаточно. При приведенных выше скоростях нарастания тока КЗ необходимо прерывать его дальнейшее развитие за время, измеряемое единицами микросекунд. Достижение таких характеристик блока защиты (БЗ) возможно только с использованием электронных выключателей.

Такой выключатель, учитывая область применения, должен обладать, кроме быстрого действия на отключение, следующими свойствами:

- двухсторонняя проводимость, как и у механических выключателей;
- низкое сопротивление в открытом состоянии, определяющее низкое падение напряжения при значительных токах, а, следовательно, и малые тепловые потери;
- высокое проходное сопротивление в закрытом состоянии;
- малые утечки тока на корпус;
- хороший запас по напряжению пробоя относительно напряжения шины с аккумуляторной и солнечной батареями;
- иметь возможность рассеяния энергии самоиндукции, возникающей при разрыве шины питания в случае срабатывания защиты от КЗ;

– конструкция и используемая комплектация должны быть рассчитаны как для работы в нормальных климатических условиях, так и для работы в глубоком вакууме, при котором проходят испытания КА.

В первом поколении КА использовались шины питания с напряжением 27–28 В, а система электропитания (СЭП) обладала общей мощностью порядка нескольких киловатт. Однако с расширением функциональности КА, появлением обитаемых научных космических станций, аппаратов для исследования других планет энергопотребление выросло до 20 и более киловатт. В результате потребовался переход СЭП на 100 В шину для улучшения ее удельных энергетических и массогабаритных показателей [17–20]. Это определило параметры проектируемого БЗ:

напряжение – до 100 В; ток – до 200 А. Мощность тепловых потерь при максимальных значениях тока и напряжения была задана не превышающей 200 Вт.

Анализ имеющегося отечественного и зарубежного опыта построения быстродействующих БЗ показал [21–26], что наиболее целесообразным является использование в качестве ключей полевых транзисторов с МОП-структурой (MOSFET англ.), позволяющих при минимальных затратах мощности на управление переключением за счет высокого входного сопротивления иметь высокое быстродействие и низкое сопротивление в открытом состоянии. Однако основной проблемой при поиске подходящих полевых транзисторов как раз стало требование низкого сопротивления в открытом состоянии при напряжении пробоя, не менее как минимум двойного рабочего.

При заданной мощности тепловых потерь, с учетом того, что БЗ, для повышения надежности отключения при возникновении КЗ, должен состоять из двух последовательных ключей, а каждый ключ для требования двухсторонней проводимости должен состоять из двух встречно-последовательно включенных транзисторов, сопротивление транзисторов в открытом состоянии не должно быть более 1 мОм. Упрощенная принципиальная схема такого соединения транзисторов и ключей приведена на рис. 2.

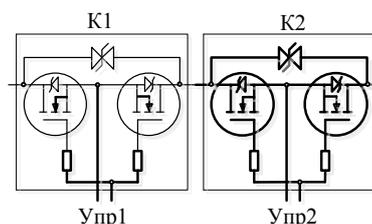


Рис. 2. Принципиальная схема соединения транзисторов и ключей

Транзисторов с такими характеристиками на данном этапе развития полупроводниковой электроники не существует, поэтому для получения требуемых параметров необходимо параллельное включение транзисторов для получения требуемого сопротивления и хорошего запаса по току.

Отличительной особенностью транзисторов с МОП-структурой является возможность их параллельной работы без тщательного подбора сопротивления в открытом состоянии $R_{ds(on)}$.

Известными из открытых источников лучшими отечественными транзисторами в керамических корпусах, позволяющих их применение в СЭС КА, с максимально допустимым постоянным напряжением сток-исток $U_{си\ max} = 200\ В$ на момент разработки БЗ являются транзисторы 2П760И с сопротивлением в открытом состоянии $R_{ds(on)} = 55\ мОм$ и 2П829Г с $R_{ds(on)} = 50\ мОм$. Однако очевидно, что столь значительное сопротивление не позволит использовать данные транзисторы, т.к. при параллельном соединении их количество отрицательно скажется на быстродействии и массогабаритных показателях БЗ.

Учитывая, что изделие предполагается использовать на этапе наземных испытаний КА, в подобных случаях считается возможным применение отдельных комплектующих не в керамических корпусах. Для таких изделий требуется более тщательно проводить предварительную дегазацию для использования их при испытаниях космической аппаратуры в ТБК.

Из отечественных изделий наилучшими характеристиками обладают MOSFEET-модули, аналоги зарубежных IRFK4H250 – МТКП1-80-2 с $R_{ds(on)} = 22$ мОм и МТКП1-100-2 с $R_{ds(on)} = 17$ мОм, а также аналог IRFK6H250 – М6ТКП-140-2 с $R_{ds(on)} = 14$ мОм. Имеющееся у этих модулей низкое сопротивление $R_{ds(on)}$ уже позволяет сконструировать БЗ, используя 20 модулей параллельно. Однако если рассматривать внутреннюю структуру этих изделий, то оказывается, что каждый модуль у первых двух уже включает по четыре параллельно соединенных транзистора, а у последнего шесть, что приводит к пропорциональному увеличению емкости затвора и к усложнению схемы управления. К тому же эти модули имеют значительные габаритные размеры по отношению к корпусам транзисторов ТО-220 или ТО-247, что также может отрицательно сказаться на массогабаритных характеристиках БЗ. Поэтому на момент проектирования было принято решение использовать зарубежный транзистор IRFP4668PbF с типичным значением $R_{ds(on)} = 8$ мОм ($I_d = 130$ А), установив по 10 таких транзисторов параллельно в каждой цепочке двух последовательных ключей. Следует отметить, что в то время, когда БЗ был уже изготовлен и проходил испытания, фирмой Infineon был выпущен транзистор IRF200P222 с еще меньшим типичным значением $R_{ds(on)} = 5,3$ мОм ($I_d = 182$ А), который можно будет использовать при дальнейшем тиражировании БЗ, получив при этом еще меньшие значения тепловых потерь при максимальном токе.

Серьезной проблемой при проектировании стал вопрос выбора датчика тока. Датчик должен обладать возможностью работы на постоянном токе прямого и обратного направлений, минимальной индуктивностью для точного преобразования тока в напряжение в широкой полосе частот. Иметь минимальное сопротивление для удовлетворения требованиям к рассеиваемой мощности на максимальном токе, а также иметь удовлетворительные массогабаритные показатели. Обычный токовый шунт, например из ряда 75 ШИСВ.1, не подходит, хотя имеет достаточную точность 0,2%, в ряду имеются номиналы для измерения тока от 10 до 2000 А, небольшие габариты, простую конструкцию, возможность работы в условиях разряженного пространства. Однако подобный класс шунтов имеет ограниченную рабочую полосу частот вследствие относительно большой индуктивности.

Эквивалентная схема шунта представляет собой активное сопротивление, последовательно с которым включены его паразитная индуктивность и параллельно емкость. Если емкость незначительна и

ею можно пренебречь, то индуктивное сопротивление оказывает существенное влияние. Динамика падения напряжения на шунте определяется формулой

$$U = R_{ш}i + L \frac{di}{dt}. \quad (1)$$

Из формулы видно, что чем больше производная тока, тем большую добавку в сопротивление вносит его индуктивная составляющая. Этой составляющей обычно пренебрегают, если

$$\omega L < 0,05R_{ш}, \quad (2)$$

где ω – эквивалентная частота фронта импульса [27]. Простые расчеты для динамики тока, приведенной на рис. 1, показывают, что для удовлетворения формуле (2) шунт должен иметь индуктивность в сотые доли наногенри. Однако в реальности индуктивность таких шунтов составляет порядка 50–70 нГн.

Специальные конструктивные приемы позволяют снизить паразитную индуктивность шунтов обычной конструкции и примером такого подхода являются, например, шунты с приемлемыми массогабаритными показателями, выпускаемые белорусской фирмой «Аякс» с использованием специальных материалов – фольги из никель-молибденового сплава и сплава «Церазин» [28]. Однако их номенклатура ограничена токами 50 А.

Отечественной и зарубежной промышленностью выпускается ряд малоиндуктивных шунтов трубчатого и коаксиального исполнения, однако рабочая полоса частот их ограничена частотами 10–50 кГц [29–31], а также они имеют значительные массогабаритные показатели для заданного значения максимального тока.

Существуют датчики тока на оптических принципах преобразования и передачи информации, это магнитооптические и акустооптические датчики [32, 33]. Достоинством их является оптическая изоляция от измерительных цепей. Используются в основном в высоковольтных применениях, имеют высокую точность, но диапазон частот до 6 кГц. Выпускаются в основном иностранными производителями.

Перспективным является класс датчиков тока, основанных на эффекте Холла. Этот эффект был открыт еще в XVIII в., но бурное развитие получил с 1990-х годов с появлением новых технологий, позволивших значительно снизить себестоимость производства самих ячеек Холла и интегральных схем на их основе, а также повысить их характеристики точности, полосы пропускания сигналов и величины измеряемых токов. Хорошей особенностью этих датчиков является наличие гальванической изоляции от измерительной цепи. Наибольший интерес для использования в проектируемом устройстве могут иметь датчики в интегральном исполнении, позволяющие их применение в условиях вакуума. Передовые позиции в производстве таких датчиков занимает немецкая фирма SENSITEC [34]. В таблице приведен перечень серий датчиков тока выпускаемых изделий.

Датчики тока фирмы SENSITEC

№ п.п.	Серия	I_{\max} , А	F_{\max} , кГц	Точн., %
1	CFS1000	1000	500	2
2	CMS2000	100	100	0,8
3	CMS3000	100	2000	0,8
4	CDS4000	150	400	0,8

Для нас наиболее близкими по параметрам могут являться датчики из серии CDS4000, имеющие при удовлетворительной точности достаточную полосу пропускания сигналов. Малое внутреннее сопротивление токопроводящей шины, равное 70 микроом, позволяет иметь минимальную мощность тепловых потерь на максимальном токе. Однако, к сожалению, ни один датчик из этой серии по току также не удовлетворяет заданному для проектируемого устройства.

Имеется еще один класс перспективных датчиков, выпускаемых швейцарской фирмой LEM [35, 36]. Отличительной особенностью является использование кольца из магнитного материала, в разрез которого устанавливается преобразователь тока в напряжение, в качестве которого может использоваться в том числе элемент на основе эффекта Холла [37]. Номенклатура изделий фирмы LEM очень широкая, и в ней можно найти по параметрам датчик на нужные значения тока, ширину полосы частот и хорошую точность. Однако данные датчики более близки по исполнению к приборам, имеют модульную структуру и корпус, как правило, из пластика, что ограничивает их применение для работы в глубоком вакууме.

Приведенный обзор показал, что подобрать готовый, выпускаемый промышленностью датчик по параметрам, требуемым для проектируемого устройства, не представляется возможным. Поэтому было решено использовать датчик собственной оригинальной разработки. В качестве базового элемента был взят пленочный безындуктивный резистор в планарном исполнении [38].

Такие резисторы в качестве датчиков тока используются довольно часто, в том числе в устройствах защиты от превышения тока и КЗ [39–41]. Они обеспечивают хорошие характеристики линейности, точности и могут использоваться для измерения величины токов в диапазоне частот до нескольких мегагерц, идеально подходят для условий эксплуатации проектируемого устройства.

Для разработки резистивного шунта были использованы одноваттные 1% резисторы с фактором 2512 номиналом 0,1 Ом. Для снижения мощности тепловых потерь было установлено 200 резисторов параллельно, что дало результирующее сопротивление 0,5 мОм. При максимальном токе 200 А мощность тепловых потерь будет равной 20 Вт. Для отвода тепла резисторы установлены между медными пластинами, отвод тепла от которых производится через теплопроводящие прокладки на корпус БЗ. Изображение шунта приведено на рис. 3.



Рис. 3. Токовый шунт

Шунт был подвергнут тепловому воздействию в диапазоне рабочих температур при эксплуатации изделия, заданной в задании на проектирование (от минус 25 до 40 °С). Испытания подтвердили, что ТКС не превосходит значения, заданного производителем резисторов (600 мм. рт. ст. / К).

Тепловым воздействиям подвергался каждый изготовленный шунт, и при установке в БЗ полученный ТКС прописывается в памяти управляющего микроконтроллера для коррекции показаний измерения тока по температуре. Датчик температуры устанавливается непосредственно на линейке резисторов шунта. Также в непосредственной близости от точки съема сигнала, для снижения помех, устанавливается плата с предварительным усилителем сигнала тока, снимаемого с шунта. Усилитель преобразует сигнал на выходе шунта в дифференциальный для дальнейшей передачи его по витой паре в блок управления БЗ.



Рис. 4. Общий вид блока защиты

Проходное сопротивление ключей, включая шунт, шины и разъемные соединения, не превысило 5 мОм во всем заданном диапазоне температур. Время срабатывания защиты составило менее 5 мкс.

Состояние каждой группы параллельно соединенных транзисторов непрерывно контролируется на состояние замкнуто/разомкнуто, а схема БЗ целиком на сопротивление изоляции относительно корпуса, которое должно быть более 20 МОм.

На рис. 4 приведен вид смонтированного БЗ со снятой крышкой. Габариты БЗ 550×250×100 мм, масса 7 кг.

Заключение

Разработанный блок защиты благодаря высокому быстродействию, которое составляет менее 5 мкс, позволяет предотвратить выход из строя электронной аппаратуры системы электропитания космического аппарата при наземных испытаниях в случае короткого замыкания в цепи аккумуляторной и солнечной батареи.

Проведенные стыковочные испытания БЗ с наземным силовым оборудованием в АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва» подтвердили правильность схемных и конструктивных решений, принятых на этапе разработки.

Литература

1. Автоматизированная система контроля энергопреобразующей аппаратуры систем электропитания космических аппаратов / Ю.А. Кремзуков, В.М. Рулевский, Ю.А. Шиняков, М.Н. Цветков // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2 (22). – С. 274–280.
2. Аппаратно-программный комплекс автоматизации процессов предстартовых испытаний систем энергообеспечения космических аппаратов / Ю.А. Шурыгин, В.Н. Мишин, Ю.А. Кремзуков // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2–1 (24). – С. 305–309.
3. Автоматизированное рабочее место отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата / О.В. Бубнов, Ю.А. Кремзуков, В.А. Пчельников, В.М. Рулевский, Ю.А. Шурыгин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 35–39.
4. Оценка величины паразитных индуктивностей тоководущих шин в источнике питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока при их размыкании / Н.П. Винтоняк, В.Д. Семенов, В.А. Кабилов, А.В. Кобзев, А.О. Сулайманов // Доклады ТУСУР. – 2016. – № 4 (19). – С. 129–132.
5. Оценка величины перенапряжения в источнике питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока при их размыкании / Н.П. Винтоняк, В.Д. Семенов, В.А. Кабилов, А.В. Кобзев, А.О. Сулайманов // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 3 (20). – С. 210–219.
6. Крючков И.П. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования / И.П. Крючков, Б.Н. Неклипаев, В.А. Старшинов. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 461 с.
7. Дураков А.А. Анализ современных автоматических выключателей / А.А. Дураков, М.Ю. Михайлова // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. – СПб.: ИЦРОН, 2015. – С. 205–209.
8. Акимов Е.Г. Автоматические выключатели: справочник / Е.Г. Акимов, М.М. Манухин. – М.: Ай Би Тех, 2005. – 376 с.
9. Колодяжный В.В. Возможности современных автоматических выключателей // Энергетические установки и технологии: сб. тр. Севастоп. гос. ун-та. – Севастополь, 2016. – Т. 2. – С. 43–49.
10. Waiss R. Energy Efficient Low-Voltage DC-Grids for Commercial Buildings / R. Waiss, L. Ott, U. Boeke // IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM). – 2015. – 5 p.
11. Hasla E. DC Task Team Report // IEEE Trans. – 2014. – Vol. 50, No. 5. – P. 2996-3003.
12. Alam M.S. Fault Current Limiters in Power Systems: A Comprehensive Review / M.S. Alam, M.A.Y. Abido, I. El-Amin // Energies. – 2018. – Vol. 11, No. 4. – 24 p.
13. Уайд Р. Электрические сети постоянного тока: новая защита от сверхтоков / Р. Уайд, Ж. Франсуа де Палма, Ж. Гонтье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/articles/elektricheskie-seti-posto-yanogotoka-novaya-zashi/>, свободный (дата обращения: 30.01.2019).
14. Performance Analysis of Surge Current Protection using Superconductors / K. Makinde, F.O. Enemuoh, O.K. Lawal, I. Umar, B. Abudakar, M.K. Mahmood // European Scientific Journal. – 2014. – Vol. 10, No. 19. – P. 183–192.

15. Okakwu I.K. Application of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) in Power Systems: A Review / I.K. Okakwu, P.E. Ojukpe, E.A. Ogujor // EJERS, European Journal of Engineering Research and Science. – Vol. 3, No. 7, July 2018. – P. 28–32.

16. Время-токовые характеристики автоматических выключателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zametkielectrika.ru/vremya-tokovye-karakteristiki-avtomaticheskix-vyklyuchatelej/>, свободный (дата обращения: 30.01.2019).

17. Лукьяненко М.В. Энерговооруженность космических аппаратов и бортовые источники электроэнергии / М.В. Лукьяненко, В.С. Кудряшов // Вестник Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнёва. Энергетика. – 2008. – № 1. – С. 141–145.

18. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышов и др. – Новосибирск: Наука: Сиб. изд. фирма, 1994. – С. 318.

19. Нестеришин М.В. Современные системы электропитания космических аппаратов информационного обеспечения производства АО «ИСС» / М.В. Нестеришин, Н.В. Стадухин, П.А. Крючков // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований: сб. науч. тр. АО «НПО Лавочкина». – 2017. – С. 476–483.

20. Черная М.М. Исследование и разработка энергопреобразующей аппаратуры высоковольтных систем электропитания космических аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2017. – 142 с.

21. Пат. 2322744 РФ, МПК H02N 9/02, H03K 17/08. Коммутатор напряжения с защитой от перегрузок по току / А.А. Федосов (РФ). – № 2005134266/09; заявл. 08.11.2005, опубл. 20.04.2008. Бюл. № 11, 6 с.

22. Пат. 2397612 РФ, МПК H03K 17/08, H02M 3/156. Коммутатор напряжения с защитой от перегрузок по току / А.Я. Бичутский (РФ). – № 2009103606/09; заявл. 03.02.2009, опубл. 20.08.2010. Бюл. № 23, 11 с.

23. Пат. 124983 РФ, МПК H01M 10/00. Устройство защиты аккумуляторной батареи от пиковых токовых нагрузок / В.Е. Вдовин, В.А. Цуранов, В.Д. Марков, А.Г. Глазов (РФ). – № 2012123124/07; заявл. 04.06.2012, опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5, 2 с.

24. Пат. 114527 РФ, МПК H01M 10/44, H02J 7/00. Устройство заряда аккумулятора и защита его от перегрузок / Е.В. Вдовин, В.А. Цуранов, С.А. Арташин (РФ). – № 2011142150/07; заявл. 18.10.2011, опубл. 10.03.2012. Бюл. № 7, 2 с.

25. Пат. 2500062 РФ, МПК H02N 7/26. Быстродействующее переключающее устройство для аккумуляторной батареи высокой мощности в изолированной сети постоянного тока / Ханс-Юрген Телле (DE), О. Ризиус (DE), А. Шульдт (DE), Г. Альф (DE), В. Маркс (DE). – № 2011104498; заявл. 26.06.2009, опубл. 27.11.2013. Бюл. № 33, 26 с.

26. Пат. 2592600 (РФ), МПК H01M 10/42, H01M 2/34. Вторичная батарея с защитой от перегрузки / У. Дональд П.Х. (TW). – №2015100557/07; заявл. 15.01.2015, опубл. 27.07.2016. Бюл. 21, 10 с.

27. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений: учеб. пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. – М.: Юрайт, 2017. – 264 с.

28. Измерительные токовые шунты от 1 до 50 А [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://ajax.by/shunt.html> свободный. (дата обращения: 15.02.2019).

29. Высокоточные шунты постоянного и переменного тока Transmille AC/DC shunts [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vltest.ru/sysfiles/files/Transmille-AC-DC-Shunts.pdf>, свободный (дата обращения: 22.02.2019).

30. Шунты токовые эталонные безреактивные серии ШЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mars.nt-rt.ru/images/manuals/ps_shunt.pdf, свободный (дата обращения: 22.02.2019).

31. Пат. 2394294 РФ, МПК H01C 3/00. Безындуктивный шунт / В.П. Гончаренко, К.К. Константинович, М.А. Витальевич (РФ). – № 2009116968/09; заявл. 04.05.2009, опубл. 10.07.2010. Бюл. № 19, 6 с.

32. Евстафьев А.И. Магнитооптический датчик электрического тока повышенной точности / А.И. Евстафьев, М.А. Ураксеев // Электротехнические комплексы и системы. – 2013. – Т. 9, № 1. – С. 84–88.

33. Абраменкова И. Оптические датчики тока и напряжения / И. Абраменкова, И. Корнеев, Ю. Троицкий // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8. – С. 60–63.

34. CDS4000 family. Compact AMR current sensors with overcurrent detection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sensitec.com/about-sensitec>, свободный (дата обращения: 25.02.2019).

35. Whats new at LEM? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lem.com/en/news>, свободный (дата обращения: 27.02.2019).

36. Прецизионные датчики тока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/LEM/High_Precision_Current_Transducers_RUS.pdf, свободный (дата обращения: 27.02.2019).

37. Гиларди М. Новые горизонты технологии датчиков тока на эффекте Холла // Силовая электроника. – 2015. – № 3. – С. 18–22.

38. Садков В.Д. Уточненная модель низкоомных пленочных резисторов с гребенчатой структурой / В.Д. Садков, А.В. Лопаткин // Изв. вузов: Электроника. – 2015. – Т. 20, № 6. – С. 607–615.

39. Колпаков А. Измерение тока в мощных импульсных преобразовательных устройствах // Электронные компоненты. – 2004. – № 2. – С. 77–83.

40. Колпаков А. Резистивные токовые шунты для применений высокой мощности / А. Колпаков, Е. Карташов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 3. – С. 84–88.

41. Датчики тока. Резисторные датчики тока в схемах на МК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nauchebe.net/2011/04/datchiki-toka%C2%A0-rezistornye-datchiki-toka-v-sxemax-na-mk/>, свободный (дата обращения: 27.02.2019).

Андреев Юрий Александрович

Канд. техн. наук, зав. лаб. научно-исследовательского института автоматизации и электромеханики Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (НИИ АЭМ ТУСУР)
Белинского ул., д. 53, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7-903-914-9344
Эл. почта: niaaem18@yandex.ru

Буров Сергей Юрьевич

Науч. сотр. НИИ АЭМ ТУСУР
Белинского ул., д. 53, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7-905-991-3951
Эл. почта: bseyr@mail.ru

Кремзуков Юрий Александрович

Канд. техн. наук, зав. отд. НИИ АЭМ ТУСУР
Белинского ул., д. 53, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7-903-950-8158
Эл. почта: kremzukov@niaaem.tomsk.ru

Andreev Y.A., Burov S.Y., Kremzukov Y.A.

Problems of protecting the spacecraft power supply system from short circuit during ground tests of the spacecraft

A schematic and constructive solution is proposed for a high-speed device for protection against short circuits in the power supply circuits of a spacecraft with battery and solar batteries to prevent the breakdown of electronic equipment.

Keywords: battery, solar battery, short circuit, space equipment, ground tests, transistor bi-directional switch, MOSFEET.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-85-91

References

1. Kremzukov Ju.A., Rulevskij V.M., Shinjakov Ju.A., Cvetkov M.N. [Automated control system for energy-converting equipment of spacecraft power supply systems]. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, no. 2 (22), pp. 274–280 (in Russ.).

2. Shurygin Ju.A., Mishin V.N., Kremzukov Ju.A. [Hardware and software complex for automation of prelaunch testing processes for spacecraft energy supply systems]. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, no. 2–1 (24), pp. 305–309 (in Russ.).

3. Bubnov O.V., Kremzukov Ju.A., Pchel'nikov V.A., Rulevskij V.M., Shurygin Ju.A. [Automated workstation for testing and testing the energy-converting equipment of the spacecraft's power supply system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 35–39 (in Russ.).

4. Vintonjak N.P., Semenov V.D., Kabirov V.A., Kobzev A.V., Sulajmanov A.O. [Estimation of the parasitic inductance of current-carrying tires in the power supply of the test complex for loading DC circuit breakers when they open]. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, no. 4 (19), pp. 129–132 (in Russ.).

5. Vintonjak N.P., Semenov V.D., Kabirov V.A., Kobzev A.V., Sulajmanov A.O. [Estimation of the overvoltage in the power supply of the test complex for loading DC circuit breakers when they open]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, no. 3 (20), pp. 210–219 (in Russ.).

6. Krjuchkov I.P., Neklipaev B.N., Starshinov V.A. *Raschet korotkih замыkanij i vybor jelektrooborudovanija* [Calculation of short circuits and selection of electrical equipment]. Moscow, Publishing Center «Academy», 2005, – 461 p. (in Russ.).

7. Durakov A.A., Mihajlova M.Ju. [Analysis of modern circuit breakers]. S. Petersburg, *ICDES*, 2015, pp. 205–209 (in Russ.).

8. Akimov E.G., Manuhin M.M. *Avtomaticheskie vykljuchateli. Spravochnik* [Circuit breakers. Directory]. Moscow, «I B Tech» Publ., 2005, 376 p. (in Russ.).

9. Kolodjazhnyj V.V. [Possibilities of modern circuit breakers]. *Power plants and technologies*. Collection of works of the Sevastopol State University, Sevastopol, 2016, vol. 2, pp. 43–49 (in Russ.).

10. Waiss R, Ott L, Boeke U. Energy Efficient Low-Voltage DC-Grids for Commercial Buildings. *IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, 2015, 5 p.

11. Hasla E. DC Task Team Report. *IEEE Trans*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 2996–3003.

12. Alam S., Abido M.A.Y., El-Amin I. Fault Current Limiters in Power Systems. A Comprehensive Review. *Energies*, vol. 11, issue 4, April 2018, 24 p.

13. Uaid R., Fransua de Palma Zh., Gont'e Zh. *Jel'ektricheskie seti postojannogo toka: novaja zashhita ot sverhtokov* [DC power networks: a new protection against overcurrents]. Available at: <https://www.elec.ru/articles/>

elektricheskie-seti-postoyannogo-toka-novaya-zashi/ (Accessed: January 30, 2019).

14. Makinde K., Enemuoh F.O., Lawal O.K., Umar I., Abudakar B., Mahmood M.K. Performance Analysis of Surge Current Protection using Superconductors. *European Scientific Journal*, July 2014 edition, vol. 10, no. 19, pp. 183–192.

15. Okakwu I.K., Orukpe P.E., Ogujor E.A. Application of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) in Power Systems. *EJERS, European Journal of Engineering Research and Science*, vol. 3, no. 7, July 2018, pp. 28–32.

16. *Time current characteristics of circuit breakers* [Time current characteristics of circuit breakers]. Available at: <http://zametkielectrika.ru/vremya-tokovye-xarakteristiki-avtomaticheskix-vyklyuchatelej/> (Accessed: January 30, 2019).

17. Luk'janenko M.V., Kudrjashov V.S. [The power ratio of spacecraft and on-board sources of electricity]. *Bulletin of the Siberian State Aerospace University. Academician M.F. Reshetneva: Energetik section*, 2008, vol. 1, pp. 141–145.

18. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshov V.I., Isljaev Sh.N. *Sistemy jelektricitaniya kosmicheskix apparatov* [Spacecraft Power Systems]. Novosibirsk, Science, Sib. publishing company, 1994, 318 p.

19. Nesterishin M.V., Staduhin N.V., Krjuchkov P.A. [Modern power supply systems for spacecraft for information support of production of JSC “ISS”]. *Actual issues of designing automatic spacecraft for fundamental and applied research: a collection of scientific papers of NPO Lavochkina JSC*, 2017, pp. 476–483 (in Russ.).

20. Chernaja M.M. *Issledovanie i razrabotka jenergo-preobrazu-jushhej apparatury vysokovol'tnyh sistem jelektricitaniya kosmicheskix apparatov* [Research and development of energy-transforming apparatus for high-voltage power systems for spacecraft]. Cand. Diss., Tomsk, 2017, 142 p.

21. Fedosov A.A. *Kommutator naprjazhenija s zashhitoy ot peregruzok po toku* [Over current switch with overcurrent protection]. Patent RF, no. 2322744, 2008.

22. Bichutskij A.A. *Kommutator naprjazhenija s zashhitoy ot peregruzok po toku* [Over current switch with overcurrent protection]. Patent RF, no. 2397612, 2010.

23. Vdovin V.E., Curanov V.A., Markov V.D., Glazov A.G. *Ustrojstvo zashhity akkumuljatornoj batarei ot pikovyh tokovyh nagruzok* [Battery protection device against peak current loads]. Patent RF, no. 124983, 2013.

24. Vdovin E.V., Tsuranov V.A., Artashin S.A. *Ustrojstvo zarjada akkumuljatora i zashhita ego ot peregruzok* [Battery charge device and protection against overload]. Patent RF, no. 114527, 2012.

25. Telle Hans-Jurgen, Rizius O., Shul'dt A., Al'f G., Marks V. *Bystrodejstvujushhee pereklyuchajushhee ustrojstvo dlja akku-muljatornoj batarei vysokoj moshhnosti v izolirovannoj seti postojannogo toka* [High Speed Switching Device for High Power Rechargeable Battery in Isolated DC Network]. Patent RF, no. 2500062, 2013.

26. Donal'd U. *Vtorichnaja batareja s zashhitoy ot peregruzki* [Secondary battery with overload protection]. Patent RF, no. 2592600, 2016.

27. Bocharov Ju.N., Dudkin S.M., Titkov V.V. *Tehnika vysokih naprjazhenij: Ucheb. posobie* [High Voltage Technique: Tutorial]. M., Yurayt, 2017, 264 p.

28. *Izmeritel'nye tokovye shunty ot 1 A do 50 A* [Measuring current shunts from 1 A to 50 A]. Available at: <http://ajax.by/shunt.html> (Accessed: February 15, 2019).

29. *Vysokotochnye shunty postojannogo i peremennogo toka Transmille AC/DC shunts* [High precision DC and AC shunts Transmille AC/DC shunts]. Available at: <http://vltest.ru/sysfiles/files/Transmille-AC-DC-Shunts.pdf> (Accessed: February 22, 2019).

30. *Shunty tokovye jetalonnnye bezreaktivnye serii ShJe* [Shunts current reference reactive Shche series]. Available at: https://mars.nt-rt.ru/images/manuals/ps_shunt.pdf (Accessed: February 22, 2019).

31. Goncharenko V.P., Konstantinovich K.K., Vital'evich M.A. *Bezinduktivnyj shunt* [Without inductive shunt]. Patent RF, no. 2394294, 2010.

32. Evstaf'ev A.I., Urakseev M.A. [High precision magneto-optical current sensor]. *Electrical complexes and systems*, 2013, vol. 9, no 1, pp. 84–88 (in Russ.).

33. Abramenkova I., Korneev I., Troickij Ju. [Optical current and voltage sensors]. *Components and Technology*, 2010, no 8. pp. 60–63 (in Russ.).

34. CDS4000 family. Compact AMR current sensors with overcurrent detection. Available at: <https://www.sensitec.com/about-sensitec> (Accessed: February 25, 2019).

35. What's new at LEM? Available at: <https://www.lem.com/en/news> (Accessed: February 27, 2019).

36. *Precizionnye datchiki toka* [Precision current sensors]. Available at: http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/LEM/High_Precision_Current_Transducers_RUS.pdf (Accessed: February 27, 2019).

37. Gilardi M. [New Horizons of Hall Effect Current Sensor Technology]. *Power Electronics*, 2015, no. 3, pp. 18–22 (in Russ.).

38. Sadkov V.D., Lopatkin A.V. [Refined model of low-resistance film resistors with a comb structure]. *University Proceedings, Electronics*, 2015, vol. 20, no. 6, pp. 607–615 (in Russ.).

39. Kolpakov A. [Current measurement in high-power pulse converting devices]. *Electronic components*, 2004, no. 2, pp. 77–83 (in Russ.).

40. Kolpakov A., Kartashov E. [Resistive current shunts for high power applications]. *Components and Technologies*, 2010, no. 3, pp. 84–88 (in Russ.).

41. *Datchiki toka. Rezistornye datchiki toka v shemah na MK* [Current sensors. Resistor current sensors in MK circuits]. Available at: <http://nauchebe.net/2011/04/datchiki-toka%C2%A0-rezistornye-datchiki-toka-v-sxemax-na-mk/> (Accessed: February 27, 2019).

Yury A. Andreev

Candidate of Engineering Sciences,
Head of Laboratory, Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NII AEM TUSUR) 53, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: + 7-903-914-9344
Email: niaaem18@yandex.ru

Sergey Y. Burov

Researcher NII AEM TUSUR
53, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: + 7-905-991-3951
Email: bseyr@mail.ru

Yury A. Kremzukov

Candidate of Engineering Sciences NII AEM TUSUR
53, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: + 7-903-950-8158
Email: kremzukov@nii.aem.tomsk.ru

УДК 621.314

С.Н. Титовский, Т.С. Титовская, Н.В. Титовская, В.Г. Середкин

Влияние цифрового представления данных в контуре управления на работу импульсного стабилизатора напряжения

Рассматриваются основные отличия в работе импульсного стабилизатора напряжения с цифровым устройством линейного управления от стабилизатора с аналоговым устройством управления, связанные с появлением погрешностей при оцифровке данных. Проводится оценка влияния этих погрешностей на работу стабилизатора и показывается, что для их уменьшения отношение количества тактов в периоде работы стабилизатора к количеству квантов шкалы аналого-цифрового преобразователя не должно быть меньше единицы. Приводятся результаты экспериментальных исследований работы импульсного стабилизатора с цифровым устройством линейного управления.

Ключевые слова: импульсный стабилизатор напряжения, линейное управление, цифровое устройство управления.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-92-96

В настоящее время источники стабилизированного напряжения используются практически повсеместно. При построении таких источников разработчики отдают предпочтение импульсным стабилизаторам напряжения, так как, по сравнению с линейными стабилизаторами, они обладают неоспоримыми и весьма существенными преимуществами – это высокий коэффициент полезного действия, и, как следствие, низкое тепловыделение, а также малая масса и небольшие габаритные размеры [1, 2]. Использование цифрового контура управления импульсными стабилизаторами, по сравнению с аналоговой реализацией, исключает температурный и временной дрейф параметров, свойственный аналоговым схемам, и является современным предметом исследования [3–5]. В этих исследованиях внимание уделяется различным методам управления [6, 7], выполнению различных сервисных функций [8], а также приводятся результаты исследований необходимой разрядности цифрового представления данных [9, 10].

Аналитическое исследование

Модель импульсного стабилизатора напряжения понижающего типа (рис. 1) содержит силовые узлы – ключ (S), катушку индуктивности (L), диод (D), а также устройство управления ключом (УУ) и источник эталонного напряжения [11, 12].

Устройство управления в данной модели представляет собой специализированный узел, выполняющий функции корректирующего звена стабилизатора, и включает в себя широтно-импульсный модулятор и вычислитель, определяющий длительность (скважность) импульсов, открывающих ключ.

Задачей устройства управления является генерация импульса открывания ключа, длительность которого зависит от отклонения измеренного выходного напряжения от эталонного:

$$T_{\text{имп}} = F(U_{\text{тек}}, U_{\text{эт}}), \quad 0 \leq T_{\text{имп}} \leq T_{\text{пер}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{имп}}$ – длительность импульса открывания ключа; $U_{\text{тек}}$ – измеренное выходное напряжение; $U_{\text{эт}}$ –

эталонное напряжение; $T_{\text{пер}}$ – длительность периода работы (запуска) стабилизатора.

По сути $F(U_{\text{тек}}, U_{\text{эт}})$ выполняет отображение диапазона изменения $U_{\text{тек}}$ на диапазон изменения $T_{\text{имп}}$:

$$[U_{\text{тек}}^{\min}, U_{\text{тек}}^{\max}] \Rightarrow [T_{\text{имп}}^{\min}, T_{\text{имп}}^{\max}], \quad (2)$$

где $U_{\text{тек}}^{\min}$, $U_{\text{тек}}^{\max}$ – минимальное и максимальное значения $U_{\text{тек}}$; $T_{\text{имп}}^{\min}$, $T_{\text{имп}}^{\max}$ – минимальное и максимальное значения $T_{\text{имп}}$.

В простейшем случае [11–14] можно использовать линейный (пропорциональный) закон управления

$$T_{\text{имп}} = T_0 + C(U_{\text{эт}} - U_{\text{тек}}), \quad (3)$$

где T_0 и C – некоторые константы.

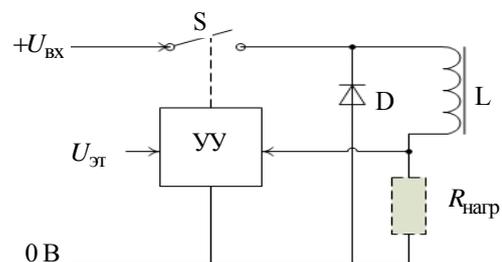


Рис. 1. Модель импульсного стабилизатора напряжения

В общем случае константу T_0 можно определить как значение $T_{\text{имп}}$, при которой $U_{\text{эт}}$ равно $U_{\text{тек}}$ (на выходе стабилизатора присутствует необходимое напряжение). Если принять во внимание возможность изменения тока, протекающего через нагрузку вследствие изменения ее сопротивления в диапазоне от $I_{\text{мин}}$ до $I_{\text{макс}}$, то T_0 есть $T_{\text{имп}}$, при которой в случае среднего тока нагрузки, равного $(I_{\text{мин}} + I_{\text{макс}})/2$, $U_{\text{эт}}$ равно $U_{\text{тек}}$, и тогда

$$T_0 = (T_{\text{имп}}^{\min} + T_{\text{имп}}^{\max}) / 2, \quad (4)$$

и в предельном случае, когда $T_{имп}^{min} = 0$, $T_{имп}^{max} = T_{пер}$,

$$T_0 = T_{пер} / 2. \tag{5}$$

Константа C определяет чувствительность стабилизатора к изменению $U_{тек}$:

$$dT_{имп} = -C dU_{тек}, \tag{6}$$

где $dT_{имп}$ – приращение длительности импульса; $dU_{тек}$ – приращение выходного напряжения; и одновременно является масштабом отображения диапазона изменения $U_{тек}$ на диапазон изменения $T_{имп}$, вследствие чего могут наблюдаться различные соотношения диапазонов изменения $U_{тек}$ и $T_{имп}$, а также появляться неиспользуемые участки этих диапазонов (рис. 2).

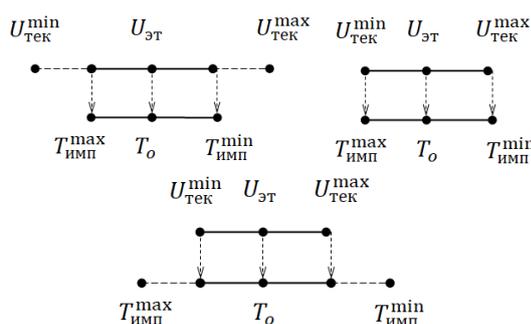


Рис. 2. Возможные соотношения диапазонов изменения $U_{тек}$ и $T_{имп}$. Пунктиром показаны неиспользуемые участки диапазонов изменения $U_{тек}$ и $T_{имп}$

В случае использования аналогового контура управления, величины напряжений и длительностей импульсов являются непрерывными, и в рабочем диапазоне $T_{имп}$ точно вычисляется согласно (3) для любого сочетания значений правой части уравнения.

При организации устройства управления в виде цифровой схемы (рис. 3) происходит переход к дискретным величинам, имеющим ограниченное количество значений.

На рис. 3 ADC – аналого-цифровой преобразователь; DC – цифровой вычислитель; CNT – счетчик тактовых импульсов; CMP – компаратор; τ – тактовые импульсы.

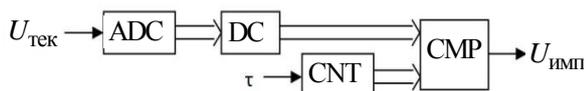


Рис. 3. Цифровой контур управления

Как видно из рис. 3, $U_{тек}$ подвергается аналого-цифровому преобразованию, что приводит к отклонению измеренного значения от истинного на величину погрешности Δ_U , которая, в свою очередь, зависит от разрядности используемого аналого-цифрового преобразователя (АЦП). $U_{эт}$ превращается в константу из набора значений, используе-

мых для представления $U_{тек}$, и также содержит погрешность Δ_U .

На рис. 3 показано, что $T_{имп}$ в цифровой схеме формируется путем счета тактовых импульсов и фактически подменяется на ближайшее кратное периоду тактовых импульсов, что приводит к появлению погрешности Δ_T , зависящей от длительности периода тактовых импульсов, а T_0 превращается в константу из набора значений, используемых для представления $T_{имп}$, и также содержит погрешность Δ_T .

С учетом дискретности величин в цифровом контуре управления закон (3), реализуемый вычислителем, превращается в

$$T_{имп} = T_0 + C (U_{эт} - U_{тек} + 2 \Delta_U) + 2 \Delta_T, \tag{7}$$

и тогда суммарная погрешность формирования $T_{имп}$ оценивается как

$$\Delta = 2 C \Delta_U + 2 \Delta_T. \tag{8}$$

Из приведенного выражения видно, что константа C стала влиять не только на чувствительность стабилизатора, но и на погрешность формирования $T_{имп}$ – с ее уменьшением уменьшается погрешность, вносимая аналого-цифровым преобразованием.

Для идеального АЦП погрешность зависит от соотношения измеряемого диапазона напряжений (шкалы) и разрядности получаемого кода:

$$\Delta_{adc} = \pm \frac{S_{max} - S_{min}}{2^{n+1}}, \tag{9}$$

где S_{max} , S_{min} – максимальное и минимальное измеряемые напряжения АЦП; n – разрядность получаемого кода.

Для обеспечения корректного отображения (2) при условии минимальной погрешности Δ_U необходимо совпадение шкалы АЦП и рабочего диапазона изменения $U_{тек}$:

$$S_{max} = U_{тек}^{max}, S_{min} = U_{тек}^{min}, \tag{10}$$

и тогда Δ_U оценивается как

$$\Delta_U = \pm \frac{U_{тек}^{max} - U_{тек}^{min}}{2^{n+1}}. \tag{11}$$

Погрешность Δ_T при соблюдении (4), (5) оценивается как

$$\Delta_T = \pm \frac{T_{пер}}{2N}, \tag{12}$$

где N – количество тактов в периоде работы стабилизатора.

Поскольку в дискретном варианте $U_{тек}$ принимает одно из возможных 2^n значений, а $T_{имп}$ превращается в количество тактов, то для минимизации погрешности Δ_T , необходимо иметь

$$N \geq 2^n, (N - 2^n) / 2 = 0, \tag{13}$$

так как в этом случае все 2^n значений $U_{\text{тек}}$ могут быть точно отображены на соответствующие количества тактов $T_{\text{имп}}$ симметрично относительно T_0 . При соблюдении данного условия Δ_T обращается в ноль и (8) превращается в

$$\Delta = 2 C \Delta_U. \quad (14)$$

В дискретном варианте константа C становится отношением количества квантов АЦП и длительности периода работы стабилизатора в тактах:

$$C = \frac{2^n}{N}, \quad (15)$$

и для соблюдения условия (13) она не должна превышать единицы, а подбор чувствительности стабилизатора, согласно (15), должен осуществляться за счет изменения количества тактов в периоде работы $T_{\text{пер}}$ с условием соблюдения (13).

Экспериментальные результаты

Корректность предложенной модели поведения импульсного стабилизатора напряжения с цифровым контуром управления, использующим линейный закон (7), была проверена на макетном образце, описанном в [15, 16], с использованием микроконтроллера ATmega128A1 с тактовой частотой 32 МГц и АЦП MAX1308 с $n = 12$ и погрешностью ± 1 квант. На рис. 4 приведены осциллограммы тока, протекающего через нагрузку в статическом режиме (неизменном сопротивлении нагрузки) при различных значениях константы C .

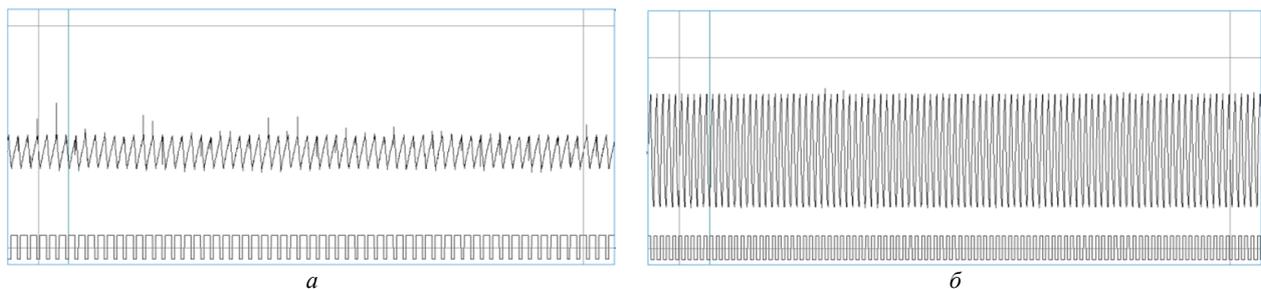


Рис. 4. Ток через нагрузку в статическом режиме:
а – $C = 4$ (длительность периода 1024 такта); б – $C = 0,25$ (длительность периода 16384 такта)

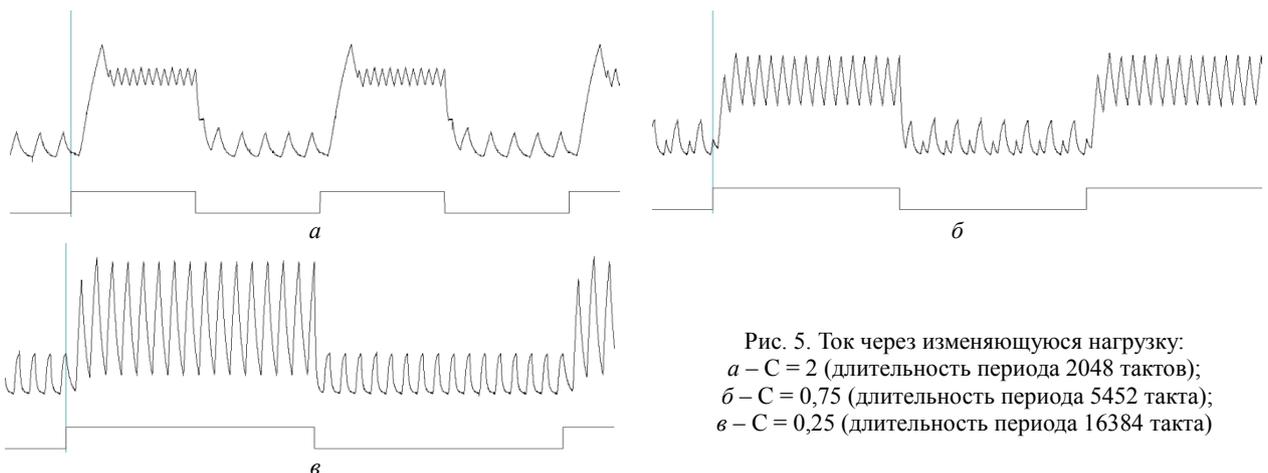


Рис. 5. Ток через изменяющуюся нагрузку:
а – $C = 2$ (длительность периода 2048 тактов);
б – $C = 0,75$ (длительность периода 5452 такта);
в – $C = 0,25$ (длительность периода 16384 такта)

На осциллограммах в нижней части показаны импульсы управления силовым ключом стабилизатора, в средней части – ток через нагрузку.

Приведенные осциллограммы в целом подтверждают закономерности, присутствующие в модели: при $C = 4$ наблюдается небольшой колебательный процесс, который с уменьшением C уменьшается и при $C = 0,25$ практически отсутствует.

С другой стороны, достаточно большое сходство полученных осциллограмм между собой позволяет сделать предположение о том, что в эксперименте использован АЦП с небольшой погрешностью, оказывающей слабое влияние на работу стабилизатора, и это влияние нуждается в дополнительном исследовании.

На том же макетном образце была проверена работа стабилизатора в условиях четырехкратного скачкообразного изменения сопротивления нагрузки через каждые шестнадцать периодов работы стабилизатора (импульсов управления ключом). Осциллограммы тока, протекающего через нагрузку в таком режиме, приведены на рис. 5.

На осциллограммах в нижней части показаны импульсы коммутации нагрузки стабилизатора, в средней части – ток через нагрузку.

Приведенные осциллограммы показывают, что увеличение константы C негативно влияет на работу стабилизатора, особенно на участках с низкой нагрузкой, так как в них присутствуют автоколебания, уменьшающиеся с уменьшением C и практически отсутствующие при $C = 0,25$.

Длительность переходных процессов (время выхода на режим при изменении нагрузки) невелика, но наблюдается небольшой выброс тока при выходе на режим с максимальной нагрузкой, который исчезает с уменьшением C .

Заключение

В представленной работе приведена аналитическая модель работы цифрового контура управления импульсным стабилизатором напряжения. Предложенная модель показывает, что для исключения погрешности цифрового представления длительности импульса открывания ключа отношение количества тактов в периоде работы стабилизатора к количеству квантов в шкале аналого-цифрового преобразования не должно быть меньше единицы. Дальнейшее увеличение этого отношения уменьшает влияние погрешности аналого-цифрового преобразования на работу стабилизатора.

Литература

1. Штрапенин Г. Новое поколение интегральных микросхем. National Semiconductor для импульсных источников питания // Компоненты и технологии. – 2007. – № 8. – С. 114–118.
2. Аналоговый мир Maxim. Новые микросхемы питания. – М.: Изд-во Maxim Integrated Products, 2014. – № 3. – 60 с.
3. Импульсный стабилизатор напряжения с цифровым управлением для автономной системы электропитания / Ю.В. Краснобаев и др. // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 11. – С. 61–73.
4. Быстродействующие импульсные стабилизаторы напряжения с модульным принципом построения и дискретным управлением / Ю.В. Краснобаев и др. // Журнал Сиб. фед. ун-та. Техника и технологии. – 2012. – Т. 5, № 3. – С. 327–339.
5. Tarchanidis K.N. Voltage Stabilizer Based on SPWM technique Using Microcontroller / K.N. Tarchanidis, J.N. Lygouras, P. Botsaris // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 2013. – Vol. 6, No. 1. – P. 38–43.
6. Liang C. A fully integrated digital LDO with voltage peak detecting and push-pull feedback loop control / C. Liang, L. Liang, Z. Wang // IEICE Electronics Express. – 2018. – Vol. 15. – doi: 10.1587/elex.15.20180611. – Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/15/15/15_15.20180611/article, свободный (дата обращения: 26.01.2020).
7. Nguyen-Van T. Digital adaptive hysteresis current control for multi-functional inverters / T. Nguyen-Van, R. Abe, K. Tanaka // Energies. – 2018. – Vol. 11, No. 9. – doi: 10.3390/en11092422. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2422/htm>, свободный (дата обращения: 26.01.2020).
8. Fixed switching frequency digital sliding-mode control of DC-DC power supplies loaded by constant power loads with inrush current limitation capability / A.El Aroudi, B.A. Martínez-Treviño, E. Vidal-Idiarte, A. Cid-Pastor // Energies. – 2019. – Vol. 12, No. 6. – doi: 10.3390/en12061055. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/6/1055/htm>, свободный (дата обращения: 26.01.2020).
9. Hamidi A. A low-cost and flexible architecture of digitally controlled DC-DC converter to improve dynamic performance / A. Hamidi, A. Ahmadi, S. Karimi // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. – 2018. – Vol. 26, No. 5. – P. 2347–2360.

10. Titovskii S.N. Influence of the digital data representation error in the linear control contour of a pulse voltage stabilizer / S.N. Titovskii, N.V. Titovskaia, T.S. Titovskaya // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – doi: 10.1088/1742-6596/1399/2/022051. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/2/022051>, свободный (дата обращения: 26.01.2020).

11. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
12. Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. – М.: Физматлит, 1963. – 968 с.
13. Иванчура В.И. Модульные быстродействующие стабилизаторы напряжения с ШИМ / В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 158 с.
14. Лукас В.А. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1990. – 415 с.
15. Титовская Н.В. Применение микроконтроллера ATxmega в устройстве управления импульсным стабилизатором напряжения / Н.В. Титовская, С.Н. Титовский // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 7 (106). – С. 58–63.
16. Титовская Н.В. Организация устройства управления импульсным стабилизатором напряжения на базе микроконтроллера / Н.В. Титовская, С.Н. Титовский // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 8 (107). – С. 87–92.

Титовский Сергей Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. информационных технологий и математического обеспечения информационных систем
Красноярского государственного аграрного ун-та
Мира пр-т, д. 90, г. Красноярск, Россия, 660049;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8305-6867>
Тел.: +7-950-414-01-31
Эл. почта: sntitovsky@rambler.ru

Титовская Татьяна Сергеевна

Ст. преп. каф. вычислительной техники
Сибирского федерального ун-та
Свободный пр-т, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041.
Тел.: +7 (391-2) 49-75-61
Эл. почта: nesesser@inbox.ru

Титовская Наталья Викторовна

Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. информационных технологий и математического обеспечения информационных систем
Красноярского государственного аграрного ун-та
Мира пр-т, д. 90, г. Красноярск, Россия, 660049;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1021-1966>
Тел.: +7-902-925-11-90
Эл. почта: nvtitov@yandex.ru

Середкин Вениамин Георгиевич

Канд. техн. наук, доцент каф. вычислительной техники
Сибирского федерального ун-та
Свободный пр-т, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041
Тел.: +7 (391-2) 49-75-61
Эл. почта: benjven@yandex.ru

Titovskii S.N., Titovskaya T.S.,
Titovskaia N.V., Seryodkin V.G.

Influence of digital data representation in control circuit on pulse voltage stabilizer

The article discusses the main differences between the operation of a pulsed voltage stabilizer with a digital linear control device and a stabilizer with an analog control device associated with the data digitization errors. An assessment of the influence of these errors on the operation of the stabilizer is made, and it is shown that to reduce it, the ratio of the number of clock cycles in the period of stabilizer operation to the number of quanta on the analog-to-digital converter scale should not be less than one. The results of experimental studies of a pulse stabilizer with a digital linear control device are presented.

Keywords: pulse voltage stabilizer, linear control, digital control device.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-92-96

References

1. Shtrapenin G. *Novoe pokolenie integral'nykh mikroshem. National Semiconductor dlja impul'snykh istochnikov pitaniya* [New generation of integrated circuits. National Semiconductor for switching power supplies]. *Components and technologies*, 2007, no. 8, pp. 114–118 (in Russ).
2. *Analogovy mir Maxim. Novye mikroshemy pitaniya* [Analog world of Maxim. New power microcircuits]. Moscow, Maxim Integrated Products Publ., 2014, no. 3, 60 p. (in Russ).
3. Krasnobaev Y.V., Nepomnyashchii O.V., Ivanchura V.I., Pozharkova I.N., Yablonskiy A.P. [Pulsed Voltage Regulator with Digital Control for Autonomous Power Supply System]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 61–73 (in Russ).
4. Krasnobayev Y.V., Kapulin D.V., Goncharuk D.V. [Quick-Switching Voltage Regulator with Modular Principle and Discrete Control]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2012, vol. 5, no. 3, pp. 327–339 (in Russ).
5. Tarchanidis K.N., Lygouras J.N., Botsaris P. Voltage Stabilizer Based on SPWM technique Using Microcontroller. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 38–43.
6. Liang C., Liang L., Wang Z. A fully integrated digital LDO with voltage peak detecting and push-pull feedback loop control. *IEICE Electronics Express*, 2018, vol. 15, doi: 10.1587/elex.15.20180611. Available at: https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/15/15/15_15.20180611/article, (Accessed: January 26, 2020).
7. Nguyen-Van T., Abe R., Tanaka K. Digital adaptive hysteresis current control for multi-functional inverters. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 9. doi: 10.3390/en11092422. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2422/htm>, (Accessed: January 26, 2020).
8. El Aroudi A., Martínez-Treño B.A., Vidal-Idiarte E., Cid-Pastor A. Fixed switching frequency digital sliding-mode control of DC-DC power supplies loaded by constant power loads with inrush current limitation capability. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6. doi: 10.3390/en12061055. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/6/1055/htm>, (Accessed: January 26, 2020).
9. Hamidi A., Ahmadi A., Karimi S. A low-cost and flexible architecture of digitally controlled DC-DC converter to improve dynamic performance. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2018, vol. 26, no. 5, pp. 2347–2360.
10. Titovskii S.N., Titovskaia N.V., Titovskaya T.S. Influence of the digital data representation error in the linear control contour of a pulse voltage stabilizer. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399. doi: 10.1088/1742-6596/1399/2/022051. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/2/022051>, (Accessed: January 26, 2020).
11. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter technology]. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2005. 632 p. (in Russ.).
12. Tsypkin Ya.Z. *Teoriya lineinykh impul'snykh sistem* [Theory of linear impulse systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1963. 968 p. (in Russ.).
14. Lukas V.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Ucheb. dlya vuzov* [Theory of automatic control: Textbook for universities]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 415 p. (in Russ.).
15. Titovskaia N.V., Titovskii S.N. *Primenenie mikrokontrollera ATxmega v ustroistve upravleniya impul'snym stabilizatorom napryazheniya* [Application of the ATxmega microcontroller in the control device of a switching voltage regulator]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2015, vol. 7 (106), pp. 58–63 (in Russ.).
16. Titovskaia N.V., Titovskii S.N. *Organizatsiya ustroistva upravleniya impul'snym stabilizatorom napryazheniya na baze mikrokontrollera* [Organization of a control device for a pulse voltage stabilizer based on a microcontroller]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2015, vol. 8 (107), pp. 87–92 (in Russ.).

Sergey N. Titovskii

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor,
Department of Information Technologies and Mathematical
Support of Information Systems,
Krasnoyarsk State Agrarian University
90, Mira pr., Krasnoyarsk, Russia, 660049
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8305-6867>
Phone: +7-950-414-01-31
Email: sntitovsky@rambler.ru

Tatyana S. Titovskaya

Senior Lecturer, Department of Computing Technique,
Siberian Federal University
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, Russia, 660041
Phone: +7 (391-2) 49-75-61
Email: nesesser@inbox.ru

Natalya V. Titovskaia

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor,
Head of Department of Information Technologies
and Mathematical Support of Information Systems,
Krasnoyarsk State Agrarian University
90, Mira pr., Krasnoyarsk, Russia, 660049
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1021-1966>
Phone: +7-902-925-11-90
Email: nvtitov@yandex.ru

Veniamin G. Seryodkin

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor,
Department of Computing Technique,
Siberian Federal University
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, Russia, 660041
Phone: +7 (391-2) 49-75-61
Email: benjven@yandex.ru

УДК 621.313.323

А.А.Р. Рахим, С.Н. Кладиев, С. Саиди

Имитационное исследование системы управления шестифазным синхронным двигателем с постоянными магнитами на основе прогнозирующей модели

Приведены результаты исследования нелинейной модели с прогнозирующим управлением шестифазным синхронным двигателем с постоянными магнитами. Предложенный алгоритм нелинейной оптимизации позволяет целенаправленно выбирать оценивающую функцию показателя качества управления для отслеживания контрольных значений управляемых переменных токов статора, сохраняя заданные ограничения. Представлены математическая модель шестифазного синхронного двигателя и схема подключения обмоток статора к инверторам. Разработан алгоритм управления с непрерывным выбором вектора фазного напряжения инвертора. Результаты имитационного моделирования показывают эффективность метода управления вращающим моментом в сбалансированных и несбалансированных режимах работы системы.

Ключевые слова: прогнозирующее управление, многофазная синхронная машина, двигатель с постоянными магнитами, инверторы напряжения.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-97-104

В последнее десятилетие синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) становятся все более популярными благодаря их высокой эффективности, высокой удельной мощности, малому объему и массе, низкой инерционности, отсутствию электрических потерь, связанных с нагревом ротора, и т.д. [1–3].

Интерес к исследованию многофазных электрических машин, в том числе синхронных, в настоящее время постоянно растет. Это обусловлено преимуществами, обеспечиваемыми наличием дополнительных фаз [4, 5], включая более низкую пульсацию вращающего момента [6], хорошую отказоустойчивость, лучшее значение магнитодвижущей силы (МДС) [7], улучшенную эффективность.

Поскольку математический аппарат и подходы к исследованию трехфазных электрических машин хорошо теоретически разработаны, то они могут быть использованы непосредственно и для многофазных машин с числом фаз, кратным трем. Электрическая машина со статорной обмоткой в виде двух звезд является одним из наиболее распространенных видов шестифазных машин, имеющих два набора трехфазных обмоток, пространственно смещенных на 30 электрических градусов относительно друг друга и с изолированными нейтральными точками [8, 9].

Известно, что элементы силового канала электроприводов систем преобразователь частоты – асинхронный или синхронный двигатель (ПЧ-АД, ПЧ-СД) не являются идеальными, поэтому преобразователи искажают форму тока и вносят несимметрию по фазам питающего напряжения. В частотно-регулируемых электроприводах с трехфазными асинхронными и синхронными двигателями были разработаны и реализованы различные методы управления [1, 2, 10, 11], которые были распространены на многофазные машины, однако среди них наиболее эффективным является метод прогнозиру-

ющего управления для преодоления таких трудностей, как несбалансированные токи с высшими гармониками и асимметрия машины. Из известных методов прогнозирующего управления выбираем обобщенное прогнозирующее управление Generalized predictive control (GPC) с двумя типами модели прогнозирующего управления (УПМ): CS-NMPC – нелинейное управление с прогнозирующей моделью и непрерывным поиском вектора управления; FS-MPC – управление с прогнозирующей моделью с конечным выбором вектора управления на рубеже прогноза [12]. По сравнению со стандартным управлением с помощью ПИ-регулятора тока и ШИМ, УПМ с конечным выбором вектора управления (FS-MPC) достигает аналогичных характеристик в устойчивом состоянии и обеспечивает лучшее качество переходного процесса и меньшее количество переключений инвертора напряжения [13]. Хотя FS-MPC избегает использования модулей ШИМ и рассматривает только конечный набор возможных состояний переключения силового преобразователя напрямую, его легко реализовать экспериментально за один шаг управления. Однако для управления системы электропривода ПЧ-СДПМ это не рекомендуется, так как обычно вызывает большие колебания тока и вращающего момента, поскольку индуктивность СДПМ очень мала [14].

В этой статье предложен алгоритм оптимизации будущих управляющих сигналов (векторов тока статора) с целью минимизации оценивающей функции, определенной на горизонте прогнозирования. Основным преимуществом предлагаемого метода является его применимость для широкого класса задач нелинейной оптимизации при непрерывном управлении (CS-MPC) [15, 16].

Контроллер выполняет предсказание на одном (первом) шаге. На каждом дискретном временном шаге вычисляются два оптимальных вектора напряжения, которые подаются через инверторы напряже-

ния (ИН) трехфазных обмоток ($a-b-c$ и $d-e-f$), используя метод векторной широтно-импульсной модуляции (рис. 1).

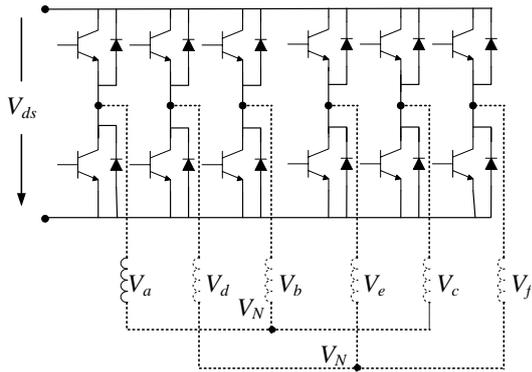


Рис. 1. Два трехфазных инвертора соединены с обмотками статора

Во втором разделе представлена математическая модель шестифазного двигателя, описывающая поведение системы в динамике. Третий раздел посвящен разработке алгоритма управления CS-NMPC. Там же приведены результаты имитационного моделирования.

Математическая модель двигателя

В последние годы модель прогнозирующего управления широко применялась для контроля тока электродвигателей, питаемых от инвертора напряжения [13, 23, 24]. Хотя концепции УПМ интуитивно понятны и предлагают простые этапы проектирования, алгоритм оптимизации должен обеспечить высокую производительность вычислений для управления в реальном времени.

Исследуемая в данной статье двойная трехфазная схема обмоток статора представляет собой шестифазную машину, имеющую два набора трехфазных обмоток ($a-b-c$, $d-e-f$) с изолированными нейтральными точками (см. рис. 1). Из-за большого числа цепей управления и сложного математического описания управление шестифазным СДПМ является сложной задачей, требующей передовых стратегий управления [15, 17–19]. Обмотки статора СДПМ получают питание от двух независимых трехфазных инверторов напряжения, использующих общую шину постоянного тока. Инверторы способны обеспечить сбалансированное распределение тока между наборами обмоток и могут уменьшить дополнительные гармоники тока [22].

Динамику шестифазной машины можно описать с помощью системы дифференциальных уравнений. Принцип моделирования с использованием сдвоенной двухфазной системы координат $d-q$ как расширение подхода двухфазной системы координат у трехфазных машин означает, что шестифазная машина управляется в двух отдельных системах отсчета $d-q$ одновременно [4, 20, 21]. Управляющие сигналы ШИМ могут генерироваться посредством обратного преобразования Парка с помощью проекций вектора напряжения U_d и U_q , а затем приводить в действие синхронный двигатель с постоянными

магнитами. После применения преобразования Парка к обоим наборам обмоток уравнения потокосцепления статора в системе $d-q$ координат можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Psi_{d1} &= L_d i_{d1} + M_d i_{d2} + \Psi_{pm}; \\ \Psi_{q1} &= L_q i_{q1} + M_q i_{q2}; \\ \Psi_{d2} &= L_d i_{d2} + M_d i_{d1} + \Psi_{pm}; \\ \Psi_{q2} &= L_q i_{q2} + M_q i_{q1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Ψ – потокосцепление; L – собственная индуктивность; M – взаимная индуктивность; i – ток; d_1 – компонент оси d первого набора обмоток, а q_2 – компонент оси q второй обмотки.

Напряжения статора в системе отсчета $d-q$:

$$\begin{aligned} U_{d1} &= R_s i_{d1} + \frac{d\Psi_{d1}}{dt} - \omega \Psi_{q1}; \\ U_{q1} &= R_s i_{q1} + \frac{d\Psi_{q1}}{dt} + \omega \Psi_{d1}; \\ U_{d2} &= R_s i_{d2} + \frac{d\Psi_{d2}}{dt} - \omega \Psi_{q2}; \\ U_{q2} &= R_s i_{q2} + \frac{d\Psi_{q2}}{dt} + \omega \Psi_{d2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ω – электрическая угловая скорость ротора, а R_s – сопротивление статора.

Электромагнитный момент двигателя с двойным комплектом трёхфазных обмоток можно выразить как [16–18] для явнополюсной машины:

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} p_n \left(\Psi_{pm} (i_{q1} + i_{q2}) + (L_d - L_q) (i_{d1} i_{q1} + i_{d2} i_{q2}) + \right. \\ &\quad \left. + (M_d - M_q) (i_{d1} i_{q2} + i_{d2} i_{q1}) \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где p_n – количество пар полюсов.

Учитывая, что для неявнополюсной машины проекции индуктивностей обмоток статора на ортогональные оси $d-q$ равны, создаваемый крутящий момент будет пропорционален сумме проекций тока статора:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \left(\Psi_{pm} (i_{q1} + i_{q2}) \right). \quad (4)$$

Алгоритм нелинейной модели прогнозирующего управления

Основная идея предлагаемого алгоритма состоит в том, чтобы найти оптимальный по амплитуде и фазе вектор напряжения путем оценки функции показателя качества для конечного набора векторов напряжения. В отличие от метода FS-MPC – управления с прогнозирующей моделью с конечным выбором управления на рубеже прогноза в зависимости от состояния силовых электронных ключей, выбранные векторы напряжения не обязательно являются дискретными векторами напряжения.

В соответствии с методом CS-NMPC – нелинейного управления с прогнозирующей моделью и непрерывным поиском вектора управления, как показано на рис. 2, после установки начальных переменных состояния с контроллера алгоритм управления устанавливает начальный вектор напряжения с амплитудой ($V_m/2 = U_m/2$) и фазой ($\theta = \pi/2$) в непре-

ривной окрестности возможных векторов напряжения. Затем находится экстремум амплитуды и фазы вектора напряжения в заданной области по методу «золотого сечения». Далее, сравнивая функцию оценки каждого вектора, область поиска уменьшается. Этот процесс повторяется до тех пор, пока об-

ласть поиска не станет достаточно малой и таким образом будет найден вектор напряжения в оставшейся области [12]. Для простоты задача оптимизации определяется как поиск амплитуд и фаз двух векторов, минимизирующих функцию показателя качества.

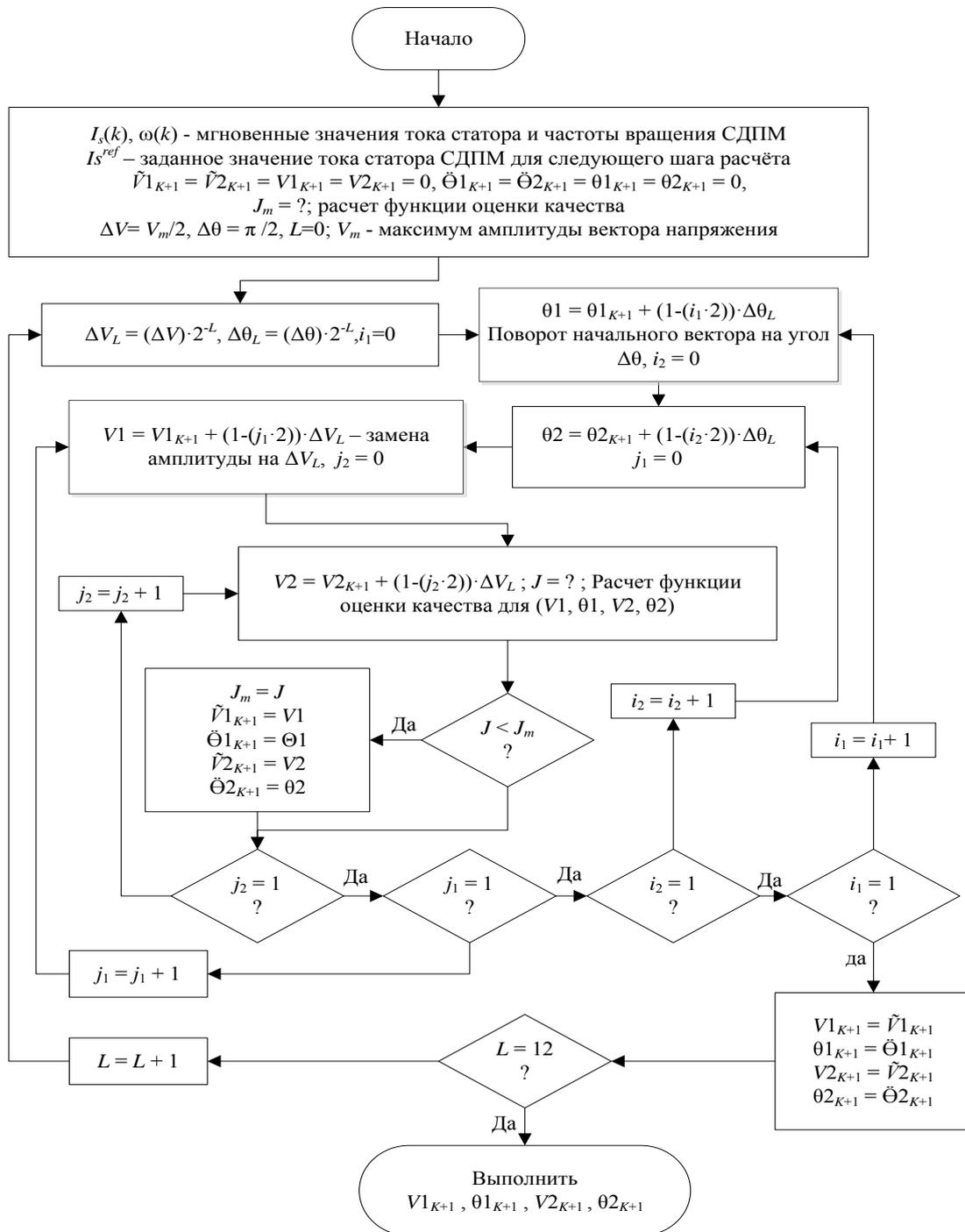


Рис. 2. Блок-схема алгоритма нелинейного управления с прогнозирующей моделью и с непрерывным поиском вектора управления СДПМ

Используя цифровые вычислительные системы на основе микропроцессорных контроллеров (ARM Cortex-M1), использующих параллельные процессы вычисления (FPGA – программируемая пользовате-

лем вентилятная матрица), время вычислений значительно уменьшается. Сокращение времени вычислений является одной из наиболее важных задач в системах управления с прогнозирующим управле-

нием, и согласно [12] в нашем случае время вычислений будет меньше 14 мс. Математическая модель сдвоенного трехфазного СДПМ используется для прогнозирования его выхода и, соответственно, вычисления функции показателя качества. Используя прямое Эйлера приближение $[dx/dt=(x_{k+1}-x_k)/T_s]$, (1), (2) и разностные уравнения для получения результата управления на следующем рубеже (горизонте) прогнозирования:

$$\begin{aligned} i_{d1(k+1)} &= i_{d1} + \frac{T_s}{L_d} \cdot (U_{d1} - R_s i_{d1} - M_d \frac{di_{d2}}{dt} + \omega \Psi_{q1}) ; \\ i_{q1(k+1)} &= i_{q1} + \frac{T_s}{L_q} \cdot (U_{q1} - R_s i_{q1} - M_q \frac{di_{q2}}{dt} - \omega \Psi_{q1}) ; \\ i_{d2(k+1)} &= i_{d2} + \frac{T_s}{L_d} \cdot (U_{d2} - R_s i_{d2} - M_d \frac{di_{d1}}{dt} + \omega \Psi_{q2}) ; \\ i_{q2(k+1)} &= i_{q2} + \frac{T_s}{L_q} \cdot (U_{q2} - R_s i_{q2} - M_q \frac{di_{q1}}{dt} - \omega \Psi_{d2}) , \end{aligned} \quad (5)$$

где T_s – время выборки. Уравнения системы (5) используются для прогнозирования будущего поведения управляемых переменных токов статора i_{d1} , i_{q1} , i_{d2} , i_{q2} для активного управляющего воздействия.

Прогноз выполняется для каждого тестового вектора. Для управления текущим вектором определена следующая функция показателя качества:

$$J = |i_{d1}^{ref} - i_{d1}^p| + G_t \cdot |i_{q1}^{ref} - i_{q1}^p| + |i_{d2}^{ref} - i_{d2}^p| + G_t \cdot |i_{q2}^{ref} - i_{q2}^p| , \quad (6)$$

где $i_{d,q}^{ref}$ – опорный ток статора; $i_{d,q}^p$ – ток статора, который вычисляется с использованием прогнозирующей модели (5); G_t – весовой коэффициент (коэффициент усиления), который используется для определения приоритетности задач управления [23, 24]. В этом исследовании коэффициент усиления равен единице.

Результаты имитационного моделирования

Моделирование СДПМ с двойной трехфазной обмоткой статора, запитанного от инвертора напряжения, проведено с целью подтверждения эффективности предложенного метода нелинейного управления с прогнозирующей моделью и непрерывным поиском вектора управления (CS-NMPC), разработанного в среде моделирования Simulink MatLab.

Метод CS-NMPC, оценивающий вектор напряжения по значениям его амплитуды и фазы с использованием токов статора, пытается минимизировать функцию оценки качества управления. На имитационной модели исследованы динамические характеристики системы электропривода преобразователь частоты (ПЧ) – шестифазный СДПМ с прогнозирующим управлением. При напряжении звена постоянного тока (DC-bus) $U_d = 500$ В, когда момент нагрузки равен 5 Н·м, для заданного значения частоты вращения 100 об/мин и несбалансированных амплитуд токов статора установим, что ток первой звезды в два раза больше тока второй звезды ($i_{q1} = 2 \cdot i_{q2}$) А.

На рис. 3, а и б приведены реактивные составляющие тока статора, которые отвечают за магнитный поток, а на рис. 3, в и г – активные составляющие тока статора, формирующие электромагнитный момент.

Хотя в имитационной модели обе трехфазные обмотки, соединенные по схеме «звезда», идентичны, но формы кривых составляющих тока на графиках отличаются друг от друга в связи с разной амплитудой токов, одновременно проходящих через каждую из обмоток (ток первой звезды в два раза больше тока второй звезды). Это сделано преднамеренно с целью проверки эффективности работы предложенного алгоритма прогнозирующего управления. С учетом того, что у двигателя основной магнитный поток формируется постоянными магнитами, колебания реактивных составляющих тока статора i_d , связанные с переключением ключей и действием взаимной индуктивности между обоими наборами обмоток во время переходного процесса, необходимы для восстановления баланса токов обеих обмоток статора. После окончания переходного процесса пуска колебания составляющих тока статора по оси d уменьшаются на порядок.

Размах колебаний активной составляющей тока статора первой обмотки в переходном процессе составляет ± 1 А, что в два раза больше колебания тока второй обмотки – $\pm 0,5$ А (рис. 3, в и г).

Время переходного процесса разгона двигателя до установившегося значения составляет 7 мс. Динамический момент СДПМ при пуске ограничен системой управления на уровне 66 Н·м, а установившийся момент соответствует моменту нагрузки 5 Н·м. На участке переходного процесса пуска, когда динамический момент стабилизируется токами i_q , участок нарастания частоты вращения имеет линейный характер при постоянном угловом ускорении.

На рис. 4 показаны переходные процессы обработки изменения угловой частоты вращения со 120 до 80 об/мин и обратно с моментом нагрузки 5 Н·м. Время снижения частоты вращения со 120 до 80 об/мин в составило 4 мс, последующий разгон электропривода на ту же скорость составил также 4 мс, а форма кривых торможения и разгона имеет монотонный характер (рис. 4, а).

Динамический момент СДПМ при ступенчатом регулировании частоты вращения также ограничен системой управления на уровне 65...66 Н·м. Установившийся момент, как и при пуске, соответствует моменту нагрузки 5 Н·м.

Переходные характеристики частичного торможения и последующего разгона электропривода, когда динамический момент СДПМ стабилизируется токами i_q , имеют участки линейного торможения и нарастания частоты вращения при постоянном значении момента на уровне $-(65...66)$ Н·м и $+(65...66)$ Н·м в течение 1 мс на каждом участке (рис. 4, б).

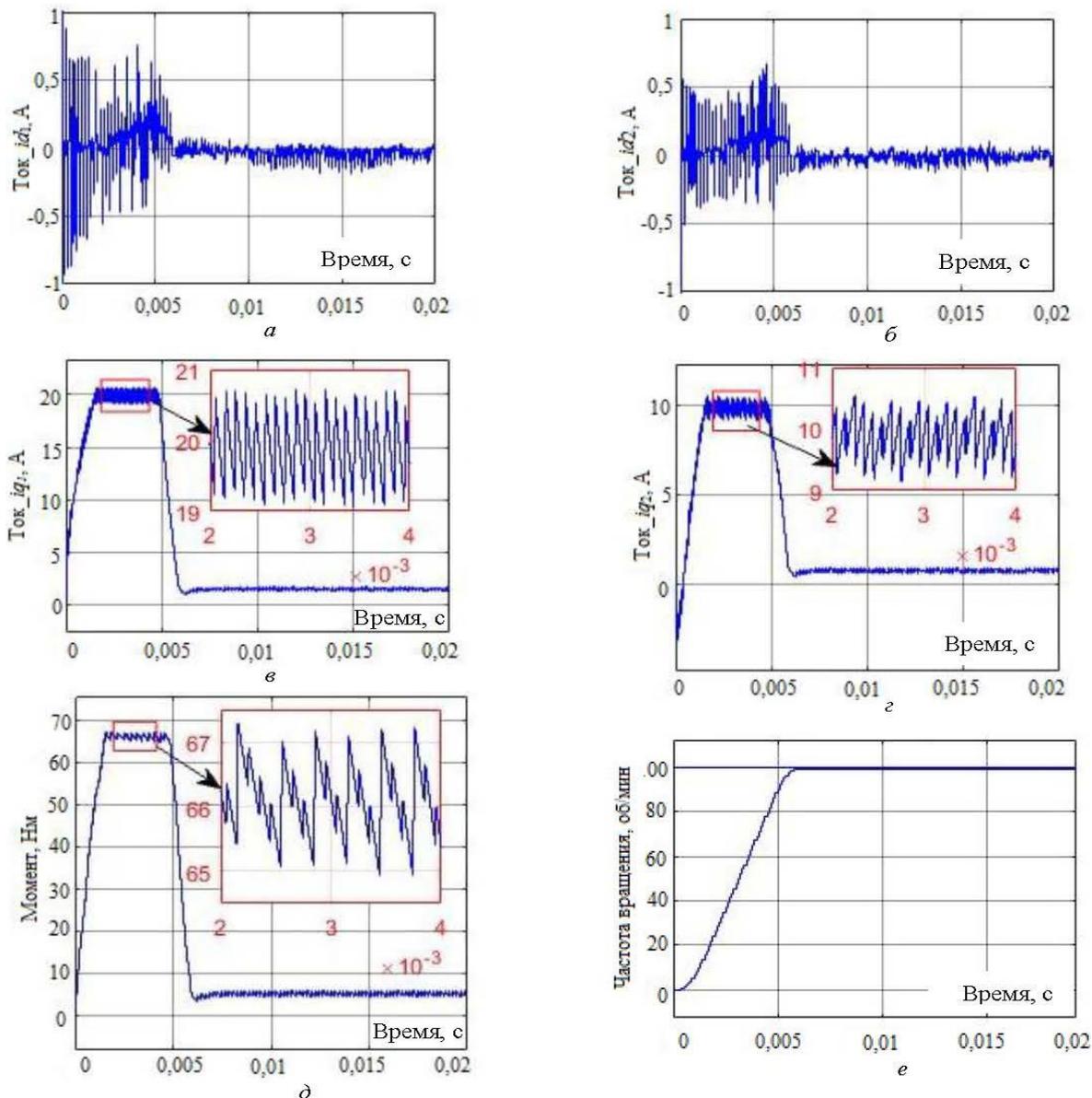


Рис. 3. Переходные характеристики шестифазного СДФМ: *a* – реактивная составляющая тока первой звезды; *б* – реактивная составляющая тока второй звезды; *в* – активная составляющая тока первой звезды; *г* – активная составляющая тока второй звезды; *д* – электромагнитный момент на валу; *е* – частота вращения

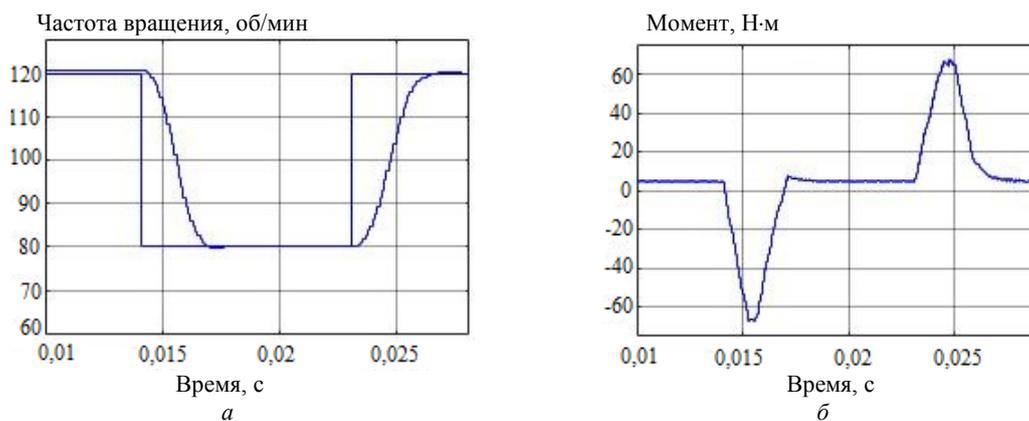


Рис. 4. Переходные характеристики при ступенчатом изменении скорости (120 – 80 – 120) об/мин: *a* – частота вращения; *б* – электромагнитный момент на валу

Заключение

Предложенный алгоритм нелинейного управления с прогнозирующей моделью и непрерывным поиском векторов управления двумя независимыми трехфазными инверторами напряжения с ШИМ-модуляцией, питающими обмотки статора шести-фазного СДПМ, работоспособен и обеспечивает заданные показатели качества регулирования.

Анализ результатов моделирования показывает, что система управления частотно-регулируемым электроприводом с СДПМ, основанная на предложенном методе прогнозирующего управления, имеет хорошую реакцию связи электромагнитного момента и магнитного потока статора, динамические показатели качества регулирования скорости соответствуют заданным значениям по быстродействию и виду переходного процесса.

Форма кривых переходных процессов скорости имеет наряду с линейными участками спада и нарастания частоты вращения апериодические участки ускорения и замедления практически без перерегулирования, и поэтому является оптимальной.

Нелинейное управление с прогнозирующей моделью и непрерывным поиском вектора управления имеет большее время реакции на управляющее воздействие, но меньший размах колебаний составляющих вектора тока статора во вращающейся системе координат, по сравнению с методом управления с прогнозирующей моделью с конечным выбором вектора управления [12].

При этом потребление электроэнергии в переходных процессах по предложенному методу прогнозирующего управления будет меньше.

В дальнейшем планируется проведение сравнительных экспериментальных исследований рассмотренных методов прогнозирующего управления шестифазным СДПМ.

Литература

- Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами / А. Рефки Абд Эль Вхаб, А.С. Каракулов, Ю.Н. Дементьев, С.Н. Кладиев // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2011. – № 4. – С. 93–99.
- Tarnetskaya A.V. The control method selection for the slow-moving permanent magnet synchronous motor used in the belt conveyor electric drive for the underground mining / A.V. Tarnetskaya, I.Y. Semykina // *Integrated Innovative Development of Zarafshan: Achievements, Problems, Prospects.* – Tashkent. – 2017. – Vol. 1, No. 2. – P. 175–180.
- Ye L. The perspective and status of PMSM electrical servo system / L. Ye, Y. Xinpin // *Micromotors ServoTechnique.* – 2001. – Vol. 4. – P. 30–33.
- Levi E. Multiphase electrical machines for variable-speed applications / E. Levi // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 2008. – Vol. 55. – P. 1893–1909.
- Multiphase Induction Motor Drives—A Technology Status Review / E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H.A. Toliyat, S. Williamson // *Elec. Power App. IET.* – 2007. – Vol. 1, No. 4. – P. 489–516.
- Direct torque control for dual three-phase induction motor drives / R. Bojoi, F. Farina, G. Griva, F. Profumo // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 2005. – Vol. 41. – P. 1627–1636.
- Khan K. On performance figures of multiphase machines / K. Khan, W. Arshad, S. Kanerva // *Proc. 18th Int. Conf. Electrical Machines 2008 (ICEM).* – 2008. – Vol. 1. – P. 1–5.
- Gopakumar K. Split-phase induction motor operation from PWM voltage source inverter / K. Gopakumar, V.T. Ranganathan, S.R. Bhat // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 1993. – Vol. 29, No. 5. – P. 927–933.
- Gopakumar M.K. Vector control of induction motor with split phase stator windings / M.K. Gopakumar, V.T. Ranganathan, S.R. Bhat // *EPE J.* – 1997. – Vol. 7, No. 1(2). – P. 61–66.
- Диаб А.А.З. Непосредственное векторное управление асинхронными электроприводами с использованием прогнозирующих моделей / А.А.З. Диаб, Д. Котин, В. Панкратов // *Инженерный вестник Дона.* – 2014. – № 1. – С. 31.
- Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008. – 298 с.
- Saeidi S. Continuous set nonlinear model predictive control for an induction motor / S. Saeidi, R. Kennel // *IEEE Trans.* – 2013. – P. 1–10.
- Predictive current control of dual three-phase drives using restrained search techniques and multi-level voltage source inverters / M.J. Duran, F. Barrero, J. Prieto, S. Toral // *IEEE Symposium on industrial Electronics (iSiE).* – 2010. – P. 3171–3176.
- Ma Z. Continuous set nonlinear model predictive control for PMSM drives / Z. Ma, S.S.R. Kennel // *Power Electronics and Applications (EPE) 2013 15th European Conference.* – 2013. – P. 1–10.
- Ren Y. Enhancement of steady-state performance indirect torque controlled dual-three phase permanent magnet synchronous machine drives with modified switching table / Y. Ren, Z.Q. Zhu // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2015. – Vol. 62, No. 6. – P. 3338–3350.
- State of the art of finite control set model predictive control in power electronics / J. Rodriguez, M. Kazmierkowski, J. Espinoza, P. Zanchetta, H. Abu-Rub, H. Young, C. Rojas // *Industrial Informatics, IEEE Transactions.* – 2013. – Vol. 9, No. 2. – P. 1003–1016.
- Zhao Y. Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition / Y. Zhao, T. Lipo // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 1995. – Vol. 31, No. 5. – P. 1100–1109.
- Modified switching-table strategy for reduction of current harmonics in direct torque controlled dual three-phase permanent magnet synchronous machine drives / K.D. Hoang, Y. Ren, Z.Q. Zhu, M. Foster // *IET ElectrPower Appl.* – 2015. – Vol. 9, No. 1. – P. 10–19.
- Direct torque control scheme for a six-phase induction motor with reduced torque ripple / J.K. Pandit, M.V. Aware, R.V. Nemade, E. Levi // *IEEE Trans. Power Electron.* – 2017. – Vol. 32, No. 9. – P. 7118–7129.
- Nezli L. Vector control with optimal torque of a salient-pole double star synchronous machine supplied by three-level inverters / L. Nezli, M. Mahmoudi // *J. Electr. Eng.* – 2010. – Vol. 61, No. 5. P. 257–263.
- Miller T.J.E. Analysis of multi-phase permanent-magnet synchronous machines / T.J.E. Miller, M.I. McGilp // *Int. Conf. Electrical Machines and Systems (ICEMS).* – 2009. – P. 1–6.
- Dual three-phase permanent magnet synchronous machine supplied by two independent voltage source inverters / J. Karttunen, S. Kallio, P. Peltoniemi, P. Silventoinen, O. Pyrhonen // *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.* – 2012. – P. 741–747.

23. A Proof of Concept Study of Predictive Current Control for VSI-Driven Asymmetrical Dual Three-Phase AC Machines / F. Barrero, M.R. Arahal, R. Gregor, S. Toral, M.J. Duran // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56, No. 6. – P. 1937–1954.

24. Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter / J. Rodriguez, J. Pontt, C.A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortes, U. Ammann // IEEE Trans. on Ind. Electr. – 2007. – 54(1). – P. 495–503.

Рахим Ари Абдулла Рахим

Аспирант Инженерной школы энергетики (ИШЭ),
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет (НИ ТПУ)
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-429-23-13
Эл. почта: aritomsk@yahoo.com

Кладиев Сергей Николаевич

Канд. техн. наук ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-812-88-13
Эл. почта: kladiev@tpu.ru

Саиди Саид

Канд. техн. наук, инженер SOBEK Drives GmbH
Оберфельд ул., д. 9, г. Роттенбург-Хайльфинген,
Германия, D-72108
Тел.: +4 (907) 45-79-43-50
Эл. почта: saeid@mail.ru

Rahim A.A.R., Kladiev S.N., Saeidi S.

Simulation study of a six-phase permanent magnet synchronous motor control system based on a predictive model

This paper presents results of a study on control system of six-phase synchronous motor with permanent magnets, built on the basis of the principle of predictive model. The objective of this work is to analyze speed control (torque control) of the rotor by controlling stator currents with stepwise speed acceleration and deceleration. A mathematical model of a six-phase synchronous motor and its structure is presented. A control algorithm with continuous selection of the inverter voltage vector has been developed. Simulation results show the effectiveness of the torque control method in balanced and unbalanced system operation modes.

Keywords: predictive control, multiphase synchronous machine, permanent magnet motor, voltage inverters.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-97-104

References

1. Refki Abd El Whab A., Karakulov A.S., Dementiev Yu.N., Kladiev S.N. Comparative analysis of vector control and direct torque control of synchronous motor with permanent magnets. News of Tomsk Polytechnic University, 2011, no. 4, pp. 93–99 (in Russ.).

2. Tarnetskaya A.V., Semykina I.Y. The control method selection for the slow-moving permanent magnet synchronous motor used in the belt conveyor electric drive for the underground mining. Integrated Innovative Development of Zaraf-

shan: Achievements, Problems, Prospects. Tashkent, 2017, vol. 1, no. 2, pp. 175–180.

3. Ye L., Xinpin Y. The perspective and status of PMSM electrical servo system. Micromotors ServoTechnique, 2001, vol. 4, pp. 30–33.

4. Levi E. Multiphase electrical machines for variable-speed applications. IEEE Trans. Ind. Appl, 2008, vol. 55, pp. 1893–1909.

5. Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H.A., Williamson S. Multiphase Induction Motor Drives-A Technology Status Review. Elec. Power App. IET, 2007, vol. 1, no. 4, pp. 489–516.

6. Bojoi R., Farina F., Griva G., Profumo F. Direct torque control for dual three-phase induction motor drives. IEEE Trans. Ind. Appl, 2005, vol. 41, pp. 1627–1636.

7. Khan K., Arshad W., Kanerva S. On performance figures of multiphase machines. Proc. 18th Int. Conf. Electrical Machines 2008 (ICEM), 2008, vol. 1, pp. 1–5.

8. Gopakumar K., Ranganathan V. T., Bhat S. R. Split-phase induction motor operation from PWM voltage source inverter. IEEE Trans. Ind. Appl, 1993, vol. 29, no. 5, pp. 927–933.

9. Gopakumar M. K., Ranganathan V.T., Bhat S.R. Vector control of induction motor with split phase stator windings. EPE J, 1997, vol. 7, no. 1(2), pp. 61–66.

10. Diab A.A. Z., Kotin D., Pankratov V. Direct vector control of asynchronous electric drives using predictive models. Engineering Bulletin of Don, 2014, no. 1, pp. 31.

11. Vinogradov A.B. Vector control of AC motors. Ivanovo: IGUU published, 2008, 298 p.

12. Saeidi S., Kennel R. Continuous set nonlinear model predictive control for an induction motor. IEEE Trans, 2013, pp. 1–10.

13. Duran M.J., Barrero F., Prieto J., Toral S. Predictive current control of dual three-phase drives using restrained search techniques and multi-level voltage source inverters. IEEE Symposium on industrial Electronics (iSiE), 2010, pp. 3171–3176.

14. Ma Z., Kennel S.S.R. Continuous set nonlinear model predictive control for PMSM drives. Power Electronics and Applications (EPE) 2013 15th European Conference, 2013, pp. 1–10.

15. Ren Y., Zhu Z.Q. Enhancement of steady-state performance indirect torque controlled dual-three phase permanent magnet synchronous machine drives with modified switching table. IEEE Trans. Ind. Electron, 2015, vol. 62, no. 6, pp. 3338–3350.

16. Rodriguez J., Kazmierkowski M., Espinoza J., Zanchetta P., Abu-Rub H., Young H., Rojas C. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics. Industrial Informatics, IEEE Transactions, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 1003–1016.

17. Zhao Y., Lipo T. Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition. IEEE Trans. Ind. Appl, 1995, vol. 31, no. 5, pp. 1100–1109.

18. Hoang K.D., Ren Y., Zhu Z.Q., Foster M. Modified switching-table strategy for reduction of current harmonics in direct torque controlled dual three-phase permanent magnet synchronous machine drives. IET ElectrPower Appl, 2015, vol. 9, no. 1, pp. 10–19.

19. Pandit J.K., Aware M.V., Nemade R.V., Levi E. Direct torque control scheme for a six-phase induction motor with reduced torque ripple. IEEE Trans. Power Electron, 2017, vol. 32, no. 9, pp. 7118–7129.

20. Nezli L., Mahmoudi M. Vector control with optimal torque of a salient-pole double star synchronous machine sup-

plied by three-level inverters. J. Electr. Eng. 2010, vol. 61, no. 5, pp. 257–263.

21. Miller T.J.E., McGilp M.I. Analysis of multi-phase permanent-magnet synchronous machines. Int. Conf. Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2009, pp. 1–6.

22. Karttunen J., Kallio S., Peltoniemi P., Silventoinen P., Pyrhonen O. Dual three-phase permanent magnet synchronous machine supplied by two independent voltage source inverters. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. 2012, pp. 741–747.

23. Barrero F., Arahal M.R., Gregor R., Toral S., Duran M.J. A proof of concept study of predictive current control for vsi-driven asymmetrical dual three-phase ac machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, pp. 1937–1954.

24. Rodriguez J., Pontt J., Silva C.A., Correa P., Lezana P., Cortes P., Ammann U. Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter. IEEE Trans. on Ind. Electr., 2007, pp. 495–503.

Ari A.R. Rahim

Post-graduate student, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU) 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-429-23-13
Email: aritomsk@yahoo.com

Sergey N. Kladiyev

Candidate of Engineering Sciences, School of Energy & Power Engineering, NR TPU 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-812-88-13
Email: kladiyev@tpu.ru

Saeid Saeidi

Ph.D., Ing. SOBEK Drives GmbH 9, Oberfeld st., Rottenburg-Hailfingen, Germany, D-72108
Phone: +4 (907) 45-79-43-50
Email: saeid@mail.ru

УДК 681.5.017

Д.Б. Зарва, А.М. Ли, В.М. Павлов, Э.Г. Батырбеков, А.А. Дериглазов

Имитационное моделирование системы импульсного электропитания токамака КТМ

Приведен краткий обзор электромагнитной системы, электротехнической части системы электропитания казахстанского материаловедческого токамака (КТМ) и структуры соответствующей системы цифрового управления. Представлена и описана имитационная модель системы импульсного электропитания и ее системы цифрового управления, разработанная в среде Simulink/Simscapе Matlab. Осуществлены синтез регуляторов и верификация алгоритмов управления источниками питания. Приведены результаты имитационного моделирования и представлены результаты сравнения модельных и экспериментально полученных данных на примере сценария, использованного при проведении физического пуска установки КТМ.

Ключевые слова: токамак КТМ, имитационное моделирование, система импульсного электропитания, система цифрового управления, регулятор.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-105-111

Проект создания комплекса казахстанского материаловедческого токамака (КТМ), реализуемый в г. Курчатов (Республика Казахстан), направлен на создание уникальной электрофизической установки (тороидальной камеры с магнитными катушками), призванной решить проблему испытания кандидатных материалов, из которых планируется изготовление ответственных узлов и комплектующих, обращённых к высокотемпературной плазме в термоядерных реакторах будущего [1–3].

Учитывая уникальность, технологическую сложность, финансовую стоимость и установленную электрическую мощность комплектующих электромагнитной системы (ЭМС) установки КТМ, а также силового электрооборудования систем внешнего и импульсного электроснабжения (СИЭП) [4, 5], представляется необходимым применение методов компьютерного имитационного моделирования на этапе разработки и внедрения систем электропитания, а также разработки и внедрения алгоритмического и информационного обеспечения их системы цифрового управления (СЦУ).

Краткое описание моделируемых систем

ЭМС токамака КТМ представляет собой систему обмоток, опоясывающих разрядную вакуумную камеру установки в тороидальном и полоидальном направлениях. В соответствии с имеющимися данными, геометрическими размерами и положением обмоток ЭМС токамака КТМ в пространстве по методикам, изложенным в [6], рассчитаны их основные электротехнические параметры – индуктивности, взаимные индуктивности и активные сопротивления.

В процессе анализа электротехнических характеристик ЭМС токамака КТМ, параметров и ограничений питающей электросети, мирового опыта создания СИЭП установок типа токамак и их систем управления [7–13] сформулированы основные требования к системам внешнего и импульсного электропитания КТМ. С учетом вышеуказанных требований разработан проект силовой части системы внешнего и импульсного электропитания комплекса КТМ [4, 5]. Определены режимы работы преобразовательного

оборудования. Выполнен расчет элементов схемы преобразовательного комплекса. Электротехническое оборудование оптимизировано для нужд СЦУ и диагностики.

Токи в обмотках ЭМС установки КТМ формируются при помощи девяти источников импульсного электропитания (ИП) [4, 5]. Согласованная работа территориально разнесенных преобразователей в составе ИП, а также ИП в общем реализуется посредством использования блока синхронизации с питающей сетью (БСПС), детектирующего моменты перехода опорного напряжения фазы «А» питающей сети через «ноль». Сигналы БСПС передаются котроллерам СЦУ для последующего формирования диаграммы управляющих импульсов модулями управления преобразователями (МУП). Телеметрические электрические сигналы измеряются, оцифровываются и передаются в СЦУ посредством специализированного измерительного телеметрического преобразователя (ПИТ).

Разработка имитационной компьютерной модели

При разработке имитационной компьютерной модели СИЭП токамака КТМ совместно с её СЦУ использовался пакет Simulink/Simscapе системы Matlab. При этом реализован структурный и параметрический синтез электросилового оборудования и оборудования СЦУ, заключающийся в построении схем замещения данного оборудования и перевода их основных параметров в относительные единицы системы Matlab.

Основными регулирующими органами СЦУ ИП токамака КТМ являются управляемые многофазные тиристорные преобразователи. В процессе построения имитационной модели СИЭП исследованы статические и динамические характеристики ИП ЭМС токамака КТМ. Статические свойства описываются внешней характеристикой преобразователя, представляющей собой семейство характеристик, определяющих зависимость средневыведенного напряжения от тока нагрузки при различных значениях угла управления $U_d = f(\alpha, I_d)$. Существует несколько

существенно различных режимов работы тиристорных преобразователей, определяющихся характером нагрузки [14–16]. Границы между режимами определяет угол коммутации γ [14], который зависит от значения выпрямленного тока и угла управления $\gamma = f(\alpha, I_d)$.

Нормальным режимом работы 12-пульсного ИП является первый режим, в котором угол коммутации $\gamma < 30^\circ$, поэтому внешнюю характеристику обычно строят для данного режима работы преобразователя. Работа ИП во втором и третьем ($\gamma = 30^\circ$ и $30^\circ < \gamma < 60^\circ$) режимах является нежелательной, так как это ведет к увеличению потерь из-за коммутационных процессов в тиристорах, при этом значение средневыпрямленного напряжения будет быстрее «заваливаться» с ростом выпрямленного тока, а соответствующие согласующие трансформаторы ИП начнут перегружаться. Режимы работы, при которых $\gamma \geq 60^\circ$, характеризуются значительной перегрузкой ИП.

В общем виде при идеально сглаженном токе внешнюю характеристику тиристорного преобразователя можно представить в виде

$$U_d = U_{d0} \cos(\alpha) - \Delta U_X(I_d) - \Delta U_R(\gamma, I_d) - \Delta U_B, \quad (1)$$

где α – угол управления, $0^\circ < \alpha < 180^\circ$; U_{d0} – напряжение холостого хода (ХХ) преобразователя при $\alpha = 0^\circ$; ΔU_X – индуктивное падение напряжения в цепи; ΔU_R – активное падение напряжения; ΔU_B – падение напряжения на ключах преобразователя.

Динамические свойства тиристорных преобразователей определяются свойствами дискретности и неполной управляемости [17–19]. Дискретность преобразователя выражается в том, что угол управления α на входе системы импульсно-фазового управления (СИФУ) воздействует на формирование выходного напряжения ИП лишь в конкретные дискретные моменты времени. Характерный масштаб времени ра-

боты преобразователя определяется пульсностью $m = 12$ и называется периодом дискретности преобразователя

$$T_{\text{ИП}} = \frac{1}{mf_0}, \quad (2)$$

где f_0 – частота питающей сети. Для всех тиристорных ИП обмоток ЭМС КТМ $T_{\text{ИП}} = 1,666(6)$ мс.

Неполная управляемость преобразователем проявляется в неодинаковом характере переходных процессов изменения выходного напряжения ИП при изменении угла управления α с определенной скоростью.

Статические и динамические характеристики тиристорных ИП являются существенно нелинейными. Статические характеристики накладывают определенные ограничения на доступный диапазон управления, что необходимо учитывать при синтезе замкнутых систем управления напряжением или током ИП с целью обеспечения устойчивости системы во всех режимах своей работы.

Синтез регуляторов и алгоритмов управления

Номинальным режимом работы СЦУ ИП обмоток ЭМС токамака КТМ (без режима регулирования тока системой управления плазмой) является режим регулирования напряжения с обратной связью в соответствии с заданной диаграммой напряжения $U_{\text{ref}}(t)$. Изменение напряжения на выходе ИП в таком режиме должно обеспечить желаемую эволюцию тока в обмотке $I(t)$ в течение эксперимента. Объектом управления является тиристорный ИП, регулируемая величина – средневыпрямленное напряжение $U_d(t)$ на выходе ИП. Функциональная схема системы управления напряжением ИП обмотки ЭМС показана на рис. 1.

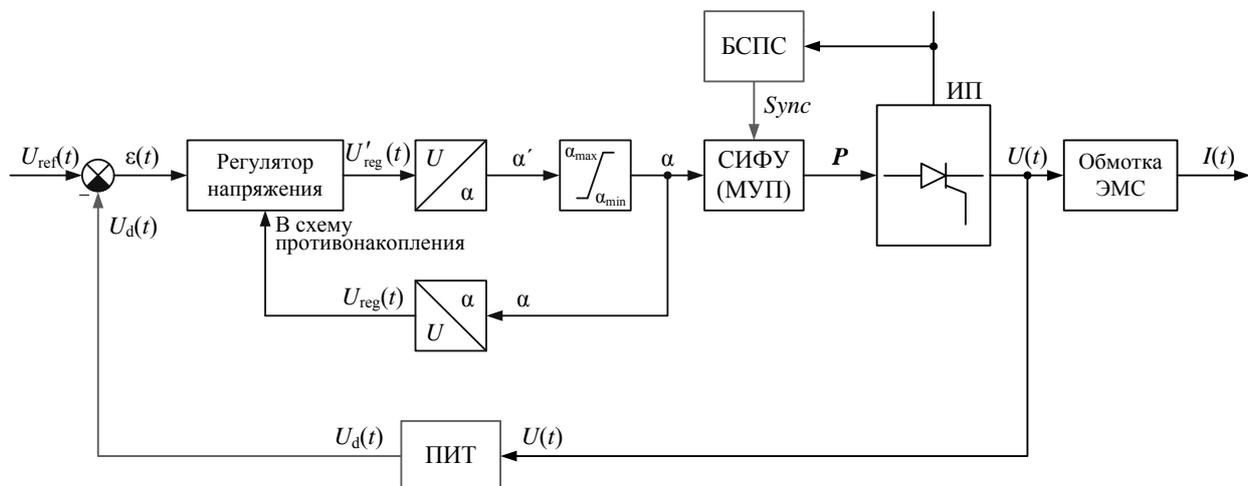


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления напряжением ИП обмотки ЭМС КТМ

Функцию измерения средневыпрямленного напряжения осуществляет модуль ПИТ. Измеренное напряжение $U_d(t)$ сравнивается с уставкой $U_{\text{ref}}(t)$, результат сравнения – сигнал рассогласования подается на регулятор, выходное напряжение которого $U'_{\text{reg}}(t)$ преобразуется в угол управления α и передается в мо-

дули МУП, которые осуществляют управление тиристорным преобразователем согласно алгоритма СИФУ.

Рассматриваемая система является дискретной как по уровню, так и по времени. Дискретность по времени определяется свойствами самого преобразо-

вателя ($T_{ИП}$ для 12-пульсного преобразователя равен 1,666(6) мс). Дискретность по уровню определяется, в основном, модулем МУП, реализующим СИФУ. Аппаратная платформа МУП реализована на базе 8-битного микроконтроллера, которая позволяет осуществить управление ИП только при целочисленных значениях угла управления α – с точностью в 1 эл. град (1°).

Средневыпрямленное напряжение объекта управления можно представить в виде

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2л} \cos(\alpha) - \Delta U_X(I_d), \quad (3)$$

при этом видно, что зависимость напряжения U_d от угла управления α – нелинейная, кроме того, U_d зависит от величины выпрямленного тока преобразователя I_d , что выражается в индуктивном падении напряжения ΔU_X вследствие процессов коммутации тока в полупроводниковых ключах тиристорного преобразователя. При известном значении I_d падение напряжения ΔU_X можно компенсировать, используя, например, комбинированную систему управления с компенсацией по возмущению. Так как в СЦУ недоступны прямые измерения выпрямленного тока I_d , будем считать падение напряжения ΔU_X возмущением, а в качестве внешней характеристики невозмущенного объекта использовать средневыпрямленное напряжение холостого хода ИП, которую используем для линеаризации объекта управления, вычисляя угол управления α' как

$$\alpha' = \arccos\left(\frac{\pi U'_{reg}}{3\sqrt{2}U_{2л}}\right), \quad (4)$$

нетрудно убедиться, что в этом случае $U_{d,xx} = U'_{reg}$. Для предотвращения аварий выпрямителя (опроки-

дывание и прорыв инвертора) угол управления α должен удовлетворять условию

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{min}, & \alpha' < \alpha_{min}, \\ \alpha', & \alpha_{min} \leq \alpha' \leq \alpha_{max}, \\ \alpha_{max}, & \alpha' > \alpha_{max}, \end{cases} \quad (5)$$

тем самым ограничивая выходную координату регулятора напряжения U_{reg} . Максимальный угол управления α_{max} должен удовлетворять условию $\alpha_{max} + \gamma + \delta \leq 180^\circ$, где запас δ необходимо взять равным $\sim 5-10^\circ$, минимальный угол управления $\alpha_{min} \geq 2^\circ$ определяется точностью модуля МУП, реализующего СИФУ, и блока БСПС, осуществляющего синхронизацию с питающей сетью.

Передаточная функция цифрового ПИ-регулятора с интегрированием по методу трапеций имеет вид

$$W_{ПИ}(z) = k \left(1 + \frac{1}{T_i} \frac{T_s}{2} \frac{z+1}{z-1} \right), \quad (6)$$

где T_s – цикл управления, k – коэффициент передачи регулятора, T_i – время интегрирования. Структурная схема системы автоматического управления средневыпрямленным напряжением ИП показана на рис. 2.

На схеме рис. 2 структура цифрового регулятора показана в рекуррентной форме, которая позволяет вычислить выходную координату регулятора на i -м цикле управления:

$$U'_{reg,i} = U_{reg,i-1} + q_0 \varepsilon_i + q_1 \varepsilon_{i-1}, \quad (7)$$

где коэффициенты q_0 и q_1 определяются параметрами настройки регулятора и циклом управления:

$$q_0 = k \left(1 + \frac{T_s}{2T_i} \right), \quad q_1 = k \left(\frac{T_s}{2T_i} - 1 \right). \quad (8)$$

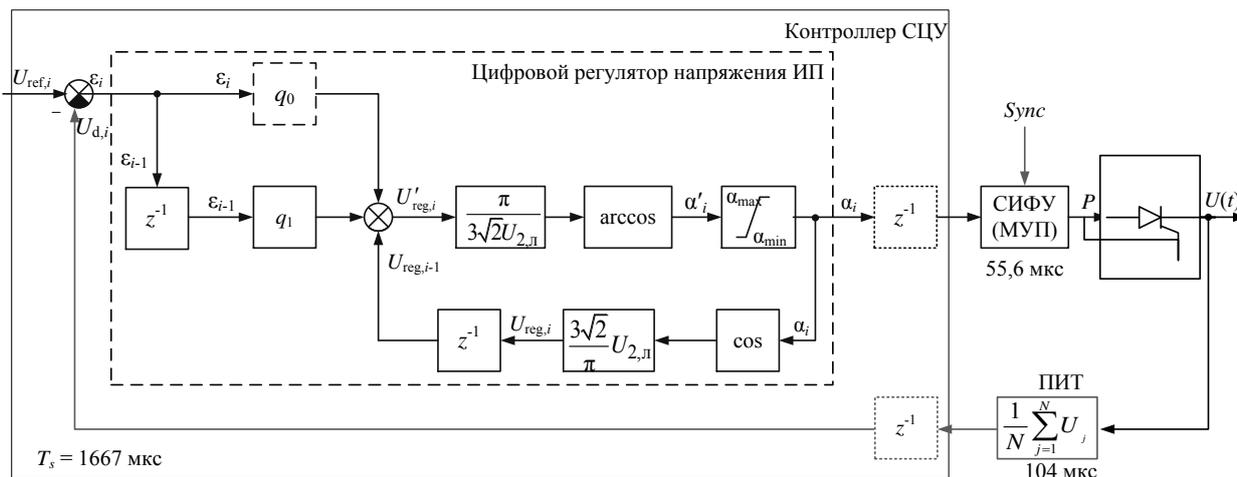


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления средневыпрямленным напряжением ИП ЭМС КТМ

Важно отметить, что в рекуррентном соотношении (7) уже реализована схема противонакопления, так как значение выходной координаты регулятора на предыдущем цикле управления $U_{reg,i-1}$ уже переопределено с учетом ограничений на угол управления (5).

Очевидно, что на выходе замкнутой системы с ПИ-регулятором напряжения в общем случае будут наблюдаться автоколебания. Поэтому при выборе ко-

эффициентов усиления необходимо прежде всего ограничить эти колебания таким образом, чтобы при постоянной уставке напряжения амплитуда установившихся колебаний угла управления не превышала 1° , в противном случае колебания напряжения на выходе ИП могут быть существенными, следовательно, для обмоток с малыми сопротивлениями и постоянными времени может быть существенно искажена

форма тока в нагрузке. Кроме того, работа мощных импульсных ИП сопровождается большим уровнем шума в каналах измерения напряжения, что может привести к увеличению амплитуды колебаний вплоть до перехода замкнутой системы в автоколебательный режим на одной из субгармонических частот [17].

Для первоначальной грубой оценки параметров настройки регулятора в качестве передаточной функции ИП можно выбрать [20, 21] $W_{\text{ИП}}(s) = \frac{e^{-T_{\text{ИП}}s}}{T_{\text{ИП}}s+1}$, где $T_{\text{ИП}} = 1,666(6)$ мс. Далее, используя известные методы расчета параметров регуляторов для линейных систем автоматического управления, можно рассчитать их коэффициенты усиления. В работе использован метод расчета параметров регулятора, основанный на критерии оптимального модуля [22]. В результате были получены первоначальные значения параметров настройки регулятора: $k_0 = 0,57143$, $T_{\text{и},0} = 1,7707$ мс. С целью уточнения параметров регулятора, используя физические модели ИП, в среде Simulink/Simscapе проводилась серия модельных экспериментов при различных входных воздействиях. Параметры настройки изменялись таким образом,

чтобы выходное напряжение соответствовало желаемому сценарию изменения токов в обмотке, а амплитуда установившихся колебаний угла управления не превышала 1° , обеспечивая тем самым устойчивость замкнутой системы. В результате были получены следующие значения параметров настройки регулятора: $k \approx 0,3$, $T_{\text{и}} \approx T_{\text{ИП}} = 1,667$ мс. Найденные значения параметров настройки регулятора напряжения ИП обмоток ЭМС были использованы при комплексной наладке СЦУ каждого ИП в реальных разрядах на токамаке КТМ.

Верификация имитационной модели

Особый интерес представляет моделирование реальных плазменных разрядов на токамаке КТМ, которое позволит выполнить сравнение результатов моделирования ИП обмоток ЭМС с замкнутой системой регулирования напряжением ИП и результатов реального эксперимента.

График результата моделирования реального разряда и полученных экспериментальных данных для ИП обмотки центрального соленоида CS как наиболее критичной с точки зрения пробоя рабочего газа и подъема тока плазмы приведен на рис. 3.

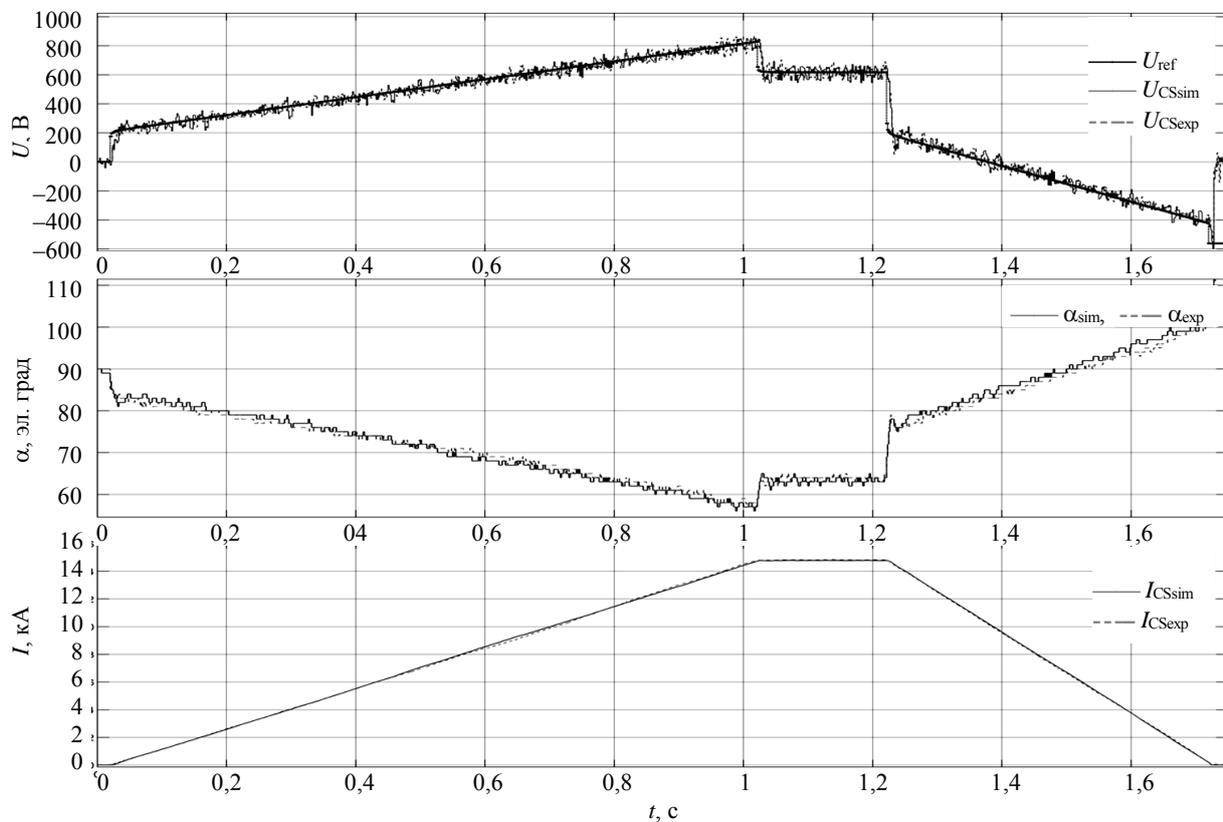


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования ИП CS (U_{CSsim} , α_{sim} и I_{CSsim}) с экспериментальными данными, полученными в ходе плазменного разряда (U_{CSexp} , α_{exp} и I_{CSexp})

На первом графике рис. 3 показаны уставка напряжений (U_{ref}), смоделированное напряжение на выходе ИП (U_{sim}) и напряжение (U_{exp}), полученное в эксперименте. На втором графике – угол управления (α_{sim} и α_{exp}), на третьем – ток в обмотке (I_{sim} и I_{exp}).

Графики величин, полученных в эксперименте, показаны пунктиром.

В целом можно отметить, что экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами моделирования, отличия в углах управления на плато

тока и напряжения составило 1–3°, что соответствует точности работы МУП (СИФУ) и БСПС.

Заключение

В настоящее время системы магнитного управления являются обязательным элементом комплекса технологических и информационных систем токамака. При этом от таких систем требуется достаточно высокая точность регулирования, поскольку плазма как объект управления очень чувствительна даже к небольшим погрешностям создания магнитной конфигурации.

В целях внедрения СИЭП, алгоритмического и информационного обеспечения её СЦУ разработана соответствующая имитационная компьютерная модель, учитывающая параметры и схемы замещения трансформаторов, параметры сети электроснабжения ВН 220 кВ, кабельных линий, ошиновки и уравнительных реакторов и иного оборудования, входящего в систему, а также статические и динамические характеристики ИП обмоток ЭМС токамака КТМ и параметры СЦУ ИП.

С использованием модели проведена верификация разработанных алгоритмов управления импульсными ИП обмоток ЭМС токамака КТМ. Результаты исследований с использованием имитационной модели были использованы для настройки контуров управления напряжениями ИП обмоток ЭМС, реализованные в контроллерах СЦУ. Результаты моделирования реальных разрядов хорошо согласуются с экспериментально полученными данными.

20 ноября 2019 г. успешно реализован завершающий этап физического пуска установки КТМ, что демонстрирует работоспособность СИЭП и её СЦУ, а также правильность принятых решений при разработке алгоритмического и информационного обеспечения СЦУ.

Спектр задач, который можно решать с использованием разработанной модели ИП ЭМС токамака КТМ, очень широк, это: синтез контуров управления напряжениями ИП и токами в обмотках ЭМС, разработка алгоритмов противоаварийной защиты ИП, проектирование импульсных систем электропитания экспериментальных комплексов (токамаков, стелараторов и др.) с целью заложить в них желаемые характеристики, осуществить выбор силового оборудования, а также сформулировать требования к системе управления ИП, обучение электротехнического персонала экспериментального комплекса. Вместе с этим разработанная модель может быть сопряжена с плазмофизическими кодами (например, код DINA) для более точного моделирования сценариев плазменного разряда.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-11-2019-013 от 11 октября 2019 г., идентификатор RFMEFI58519X0007, а также в рамках бюджетной научно-технической программы Министерства энергетики РК «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахском материаловедческом токамаке КТМ».

Литература

1. Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние // Н.А. Назарбаев, В.С. Школьник, Э.Г. Батырбеков, С.А. Березин, С.Н. Лукашенко, М.К. Скаков. – Курчатов: Изд-во РГП «Национальный ядерный центр РК», 2016. – Т. 1. – С. 35–60.
2. Казахский материаловедческий токамак КТМ и вопросы термоядерного синтеза / Э.А. Азизов, И.Л. Тажибаева, Е.П. Велихов, В.С. Школьник и др. – Алматы: Изд-во «Glory K», 2006. – 236 с.
3. KTM Experimental Complex project Status / I.L. Tazhibayeva, E.A. Azizov, V.A. Krylov, V.S. Shkolnik, E.P. Velikhov et al. // Fusion Science and Technology. – 2005. – Vol. 47. – P. 746–750.
4. Электротехнический комплекс системы импульсного электропитания токамака КТМ / Д.Б. Зарва, А.А. Дериглазов, Э.Г. Батырбеков, И.Л. Тажибаева, В.М. Павлов, А.М. Ли, А.А. Мезенцев, С.В. Меркулов, Ю.Н. Голобоков // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. – 2018. – Т. 41, № 2. – С. 59–70.
5. Система противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ. Алгоритмическое и информационное обеспечение / Д.Б. Зарва, А.А. Дериглазов, Э.Г. Батырбеков, И.Л. Тажибаева, В.М. Павлов, А.М. Ли, А.А. Мезенцев, С.В. Меркулов, Ю.Н. Голобоков // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42, № 1. – С. 74–88.
6. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
7. Lampasi A. Survey of Electric Power Supplies Used in Nuclear Fusion Experiments / A. Lampasi, S. Minucci // Proc. of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. – Milan (Italy). – 2017. – P. 1–6.
8. Control and instrumentation of the ITER coil power supply system / J.K. Goff, I. Benfatto, J. Tao, I. Yonekawa, K.C. Hwang et al. // Proc. of the IET Conference on Control and Automation: Uniting Problems and Solutions. – Birmingham (UK). – 2013. – P. 10–16.
9. Final design of the Korean AC/DC converters for the ITER coil power supply system / J.-S. Oh, J. Choi, J.-H. Suh, J. Choi, L. Lee et al. // Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol. 98–99. – P. 1127–1130.
10. ITER coil power supply and distribution system / J. Tao, I. Benfatto, K. Goff, A. Mankani, F. Milani, et al. // Proc. of the IEEEINPSS 24th Symposium on Fusion Engineering. – Chicago (IL, USA), 2011. – P. 5–6.
11. Overview of the new Magnet Power Supply Systems of JT-60SA procured by EU / L. Novello, O. Baulaigue, A. Colletti, N. Dumas, A. Ferro et al. // Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol. 98–99. – P. 1122–1126.
12. The DTT device: Power supplies and electrical distribution system / A. Lampasi, P. Zito, F. Starace, P. Costa, G. Maffia, S. Minucci et al. // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 122. – P. 356–364.
13. Bertolini E. The JET magnet power supplies and plasma control systems / E. Bertolini, P.L. Mondino, P. Noll // Fusion Technology. – 2017. – Vol. 11. – P. 84.
14. Фишлер Я.Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я.Л. Фишлер, Р.Н. Урманов, Л.М. Пестряева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.
15. Беркович Е.И. Полупроводниковые выпрямители. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е.И. Беркович, В.Н. Ковалев, Ф.И. Ковалев. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.

16. Каганов И.Л. Электронные и ионные преобразователи // Цепи питания и управления ионных приборов. – Л.: Госэнергоиздат, 1956. – Т. 3. – 528 с.
17. Шипилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.
18. Донской Н.В. Динамика вентильного электропривода постоянного тока. – М.: Энергия, 1975. – 224 с.
19. Донской Н.В. Управляемый выпрямитель в системах автоматического управления. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 352 с.
20. Leonhard W. Control of Electrical Drives (3rd ed.). – Berlin.: Springer, 2001. – 473 p.
21. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. – М.: Наука. – 1970. – 320 с.
22. Гурецких Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.

Зарва Денис Борисович

Нач. управления инвестиционных проектов РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» Бейбит атом ул., зд. 2Б, г. Курчатов, Восточно-Казахстанская обл., Республика Казахстан, 071100
Тел.: +7-777-286-28-80
Эл. почта: zarva@nnc.kz

Ли Алексей Михайлович

Программист Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-63-40
Эл. почта: alee@tpu.ru

Павлов Вадим Михайлович

Канд. техн. наук, доцент Инженерной школы ядерных технологий НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-63-40
Эл. почта: pavlov@tpu.ru

Батырбеков Эрлан Гадлетович

Д-р физ.-мат. наук, профессор, ген. директор РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» Бейбит атом ул., зд. 2Б, г. Курчатов, Восточно-Казахстанская обл., Республика Казахстан, 071100
Тел.: +7-722-513-33-33
Эл. почта: batyrbekov@nnc.kz

Дериглазов Алексей Алексеевич

Инженер-проектировщик Инженерной школы ядерных технологий НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 606-340
Эл. почта: aad3@tpu.ru

Zarva D.B., Lee A.M., Pavlov V.M., Batyrbekov E.G., Deriglazov A.A.

Simulation Modeling of Pulse Power Supply System of Kazakhstani Material Testing Tokamak KTM

A brief overview of electromagnetic system, electrical specification of Tokamak KTM power supply system and structure of corresponding digital control system is given. Simulation model of pulse power supply system and its digital control sys-

tem developed in Simulink/Simscapе Matlab is presented and described. The design of controllers and verification of control algorithms with power sources is carried out. The results of simulation modeling are given and the comparison results of model and experimentally obtained data are presented on the example of the scenario used during the physical commissioning of KTM facility.

Keywords: Tokamak KTM, Simulation Modeling, Pulse Power Supply System, Digital Control System, Controller.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-105-111

References

1. Nazarbayev N.A., Shkol'nik V.S., Batyrbekov E.G., Berezin S.A., Lukashenko S.N., Skakov M.K. [Carrying Out Scientific-Technical and Engineering Works to Bring the Former Semipalatinsk Test Site to a Safe Condition]. Kurchatov, RSE «National Nuclear Center of RK» Publ., 2016, vol. I, pp. 35–60 (in Russ.).
2. Azizov E.A., Tazhibayeva I.L., Velikhov Ye.P., Shkol'nik V.S., et al. [Kazakhstan Material Testing Tokamak KTM and Thermonuclear Fusion Issues]. Almaty, «Glory» Publ., 2006. 236 p. (in Russ.).
3. Tazhibayeva I.L., Azizov E.A., Krylov V.A., Shkol'nik V.S., Velikhov Ye.P., et al. KTM Experimental Complex project Status. *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 47, pp. 746–750.
4. Zarva D.B., Deriglazov A.A., Batyrbekov E.G., Tazhibayeva I.L., Pavlov V.M., Lee A.M., Mezentsev A.A., Merkulov S.V., Golobkov Yu.N. [Electrotechnical Complex of Tokamak KTM Pulse Power Supply System]. *Nuclear Science and Technology Issues. Series Thermonuclear Fusion*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 59–70 (in Russ.).
5. Zarva D.B., Deriglazov A.A., Batyrbekov E.G., Tazhibayeva I.L., Pavlov V.M., Lee A.M., Mezentsev A.A., Merkulov S.V., Golobkov Yu.N. [Emergency Protection System of Electrotechnical Tokamak KTM Facility. Algorithmic and information support]. *Nuclear Science and Technology Issues. Series Thermonuclear Fusion*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 74–88 (in Russ.).
6. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. [Inductivities Calculation. Reference book]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p. (in Russ.).
7. Lampasi A., Minucci S. Survey of Electric Power Supplies Used in Nuclear Fusion Experiments. *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2017, pp. 1–6.
8. Goff J.K., Benfatto I., Tao J., Yonekawa I., Hwang K.C. et al. Control and Instrumentation of ITER Coil Power Supply System. *IET Conference on Control and Automation: Uniting Problems and Solutions*, 2013, pp. 10–16.
9. Oh J.-S., Choi J., Suh J.-H., Choi J., Lee L., et al. Final design of Korean AC/DC converters for ITER coil power supply system. *Fusion Engineering and Design*, 2015, vol. 98–99, pp. 1127–1130.
10. Tao J., Benfatto I., Goff J.K., Mankani A., Milani F., et al. ITER coil power supply and distribution system. *IEEE-INPSS 24th Symposium on Fusion Engineering*, 2011, pp. 5–6.
11. Novello L., Baulaigue O., Coletti A., Dumas N., Ferro A., et al. Overview of the new Magnet Power Supply Systems of JT-60SA procured by EU. *Fusion Engineering and Design*, 2015, vol 98–99, pp. 1122–1126.
12. Lampasi A., Zito P., Starace F., Costa P., Maffia G., Minucci S., et al. DTT device: Power supplies and electrical distribution system. *Fusion Engineering and Design*, 2017, vol. 122, pp. 356–364.
13. Bertolini E., Mondino P.L., Noll P. The JET magnet power supplies and plasma control systems. *Fusion Technology*, 2017, vol. 11, p. 84.

14. Fishler Ya.L., Urmanov R.N., Pestyayeva L.M. [Transformer Equipment for Converting Facilities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 320 p. (in Russ.).

15. Berkovich Ye.I., Kovalyov V.N., Kovalyov F.I. [Semiconductor rectifiers (2th edition, rev. and suppl.)]. M., Energiya Publ., 1978, 448 p. (in Russ.).

16. Kaganov I.L. [Electronic and Ion Transformers. Ion Devices Control and Supply Chains (vol. III)]. Leningrad, Gosenergoatomizdat Publ., 1956, 528 p. (in Russ.).

17. Shipillo V.P. [Automated electrical drive]. Moscow, Energiya Publ., 1969, 400 p. (in Russ.).

18. Donskoy N.V. [Dynamics of DC electrical drive]. Moscow, Energiya Publ., 1975, 224 p. (in Russ.).

19. Donskoy N.V. [Controlled Rectifier in Automatic Control System]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 352 p. (in Russ.).

20. Leonhard W. *Control of Electrical Drives (3rd ed.)*. Berlin, Springer Publ, 2001, 473 p.

21. Bulgakov A.A. [New Theory of Controlled Rectifiers]. Moscow, Science Publ., 1970, 320 p. (in Russ.).

22. Guretskikh Kh. [Analysis and Development of Delayed Control Systems]. Moscow, Machine Engineering Publ., 1974, 328 p. (in Russ.).

Alexey M. Lee

Software Specialist, School of Nuclear Science and Engineering
National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-63-40
Email: alee@tpu.ru

Vadim M. Pavlov

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
School of Nuclear Science and Engineering NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-63-40
Email: pavlov@tpu.ru

Erlan G. Batyrbekov

Doctor of Physics and Mathematics, Professor,
Director General of RSE «NNC RK»
2B, Beibyt Atom st., Kurchatov, East Kazakhstan region,
Republic of Kazakhstan, 071100
Phone: +7-722-51-3-33-33
Email: batyrbekov@nnc.kz

Denis B. Zarva

Head, Investment Projects Department RSE
«National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan»
(RSE «NNC RK»)
2B, Beibyt Atom st., Kurchatov, East Kazakhstan region,
Republic of Kazakhstan, 071100
Phone: +7-777-286-28-80
Email: zarva@nnc.kz

Alexey A. Deriglazov

Design Engineer,
School of Nuclear Science and Engineering NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-63-40
Email: aad3@tpu.ru

Требования к подготовке рукописей статей,

представляемых для публикации в журнале

«Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»

1. Электронный вариант статьи должен быть представлен в виде файла, названного по-русски фамилией первого автора, на дискете или диске в формате Word 2003–2016. Предпочтительнее представить его по электронной почте.

2. Оригинал на бумажном носителе должен полностью соответствовать электронному варианту.

3. Статья должна иметь (в порядке следования): УДК; И.О. Фамилии авторов; заглавие; аннотация (не реферат); ключевые слова; основной текст статьи; список библиографий под подзаголовком «Литература»; сведения об авторах; далее на английском языке: Фамилии авторов И.О., заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова. Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, электронный адрес.

4. Текст статьи должен быть размещен в две колонки без принудительных переносов через один интервал шрифтом Times New Roman 10 кегля на одной стороне листа белой писчей бумаги формата А4, без помарок и вставок. Для облегчения форматирования прилагается **шаблон статьи**, который размещен на сайте: journal.tusur.ru. 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 – так же как и в тексте. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте (... на рис. 3, ... в табл. 2).

10. Рисунки и фотографии должны быть **черно-белыми**, четкими, контрастными, аккуратными, сгруппированными. Графики – не жирно, сетка – четко. Единицы измерения – на русском. Десятичная запятая (не точка). Рисунки могут быть выполнены в программах CorelDraw, Illustrator, Word, Visio и должны давать возможность внесения исправлений.

11. Иллюстрации, должны быть разрешением не менее 600 dpi. Масштаб изображения – 8 или 16,7 см по ширине (при условии читаемости всех надписей, выполненных шрифтом Times New Roman, после масштабирования – 9 кегль).

12. На все источники, указанные в списке литературы, должны быть ссылки по тексту (нумерация в порядке упоминания, например, [1, 2], [5–7]). Описание источников должно соответствовать ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008 и содержать всю необходимую для идентификации источника информацию, а именно: *для неперiodических изданий* – фамилию и инициалы автора, полное название работы, место издания, название издательства, год издания, количество страниц; *для периодических изданий* – фамилию, инициалы автора, полное название работы, название журнала, год выпуска, том, номер, номера страниц (см. примеры оформления библиографий).

Бумажный вариант рукописи статьи должен быть подписан авторами и (для сторонних авторов) иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Материальные претензии авторов, связанные с распространением материалов их статей после опубликования, не принимаются.

Авторы несут полную ответственность за содержание статей и за последствия, связанные с их публикацией.

Контактная информация

Адрес: 634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Эл. почта: vnmas@tusur.ru. Тел.: +7 (382-2) 51-21-21

