



Доклады ТУСУР. 2022 • Том 25, № 1

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442



ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

2022 • Том 25, № 1



9 771818 044708 02007



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
2022, том 25, № 1**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Редакционная коллегия

В.М. Рулевский, д.т.н., доцент, ректор ТУСУРа, научный руководитель направления НИИ АЭМ ТУСУРа, Томск, Россия (*гл. редактор*).

А.А. Шелупанов, д.т.н., проф., президент ТУСУРа, заслуженный работник высшей школы РФ, почётный работник науки и техники РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования, дважды лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2393-6701> (*зам. гл. редактора*).

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

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

М.П. Батура, д.т.н., проф., гл. науч. сотрудник, БГУИР, заслуженный работник образования Республики Беларусь, Минск, Беларусь.

Б.А. Беляев, д.т.н., проф., зав. лабораторией ЭИСВЧЭ, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, заслуженный изобретатель России, Красноярск, Россия.

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

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

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

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

Г.А. Кобзев, к.т.н., проректор по международному сотрудничеству, ТУСУР.

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

Ю.Н. Кульчин, д.ф.-м.н., академик РАН, научный руководитель, 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, зав. лабораторией плазменных источников, 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, советник директора, 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, 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., каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа, вед. науч. сотрудник лаб. медико-биологических исследований (ЛМБИ), Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-9355-7638>.

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., 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, 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.

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

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

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

Корректор В.Г. Лихачева.

Подписано в печать 25.03.2022. Формат 60×84 1/8. Печ. л. 8,1. Тираж 500. Заказ 3.

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, Doctor 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, Department of Data Processing Automation, TUSUR University, Doctor of Engineering.
- Vyacheslav M. Isaev** First Deputy Director, Mytishchi Research Institute of Radio Measurement Instruments, Doctor of Engineering.
- Gennady A. Kobzev** Vice-Rector for International Cooperation, TUSUR University, Candidate of Engineering.
- Anatoly M. Korikov** Professor, Department of Automated Control Systems of TUSUR University, Doctor of Engineering.
- Yury N. Kulchin** Scientific Director, 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, 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, Institute of Space Sciences, Barcelona, Spain, Doctor of Physics and Mathematics.
- 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's Advisor 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. Hodashinsky** Professor, 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.
- Vladimir V. Shaidurov** Director, 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, 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

Лощилов А.Г., Чинь Т.Т., Малютин Н.Д., Малютин Г.А. Синтез связанных полосковых линий с гетерогенным диэлектрическим заполнением	7
Мовчан А.К., Рогожников Е.В., Дмитриев Э.М., Новичков С.А., Лаконцев Д.В. Расчет ослабления сигнала сетей сотовой связи 5G для частот диапазона FR1	17
Жечев Е.С., Иванцов И.А., Козинец А.С. Анализ и систематизация способов трассировки печатных проводников на основе симметричных структур с модальной фильтрацией	24
Костелецкий В.П. Обзор гибридных фильтров для защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных помех	37
Божков В.Г., Бекезина Т.П., Бурмистрова В.А. Диоды с барьером Шоттки на основе термостойких контактов Ir-GaAs и Pt/Ir-GaAs, созданных электрохимическим осаждением	48

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Кручинин Д.В. Модификация метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе применения производящих функций многих переменных и приближенных вычислений	55
Милько Д.С., Данеев А.В., Горбылев А.Л. База знаний экспертной системы оценки угроз безопасности информации	61
Осинцев А.В., Комнатнов М.Е. Метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера на основе аппаратного подсчета контрольной суммы	70
Куртукова А.В., Романов А.С., Федотова А.М., Шелупанов А.А. Применение методов машинного обучения и отбора признаков на основе генетического алгоритма в решении задачи определения автора русскоязычного текста для кибербезопасности	79
Круглов С.П., Аксаментов Д.Н. Адаптивное управление мостовым краном по скорости перемещения тележки	86
Соловьев Н.А., Валеев А.Ф. Развитие модели живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин	93
Катаев М.Ю., Лукьянов А.К., Ткаченко П.Н. Методика определения времени вскрытия и замерзания реки по защищенным многоспектральным спутниковым данным и измерениям прибором MODIS	101
Алимханова А.Н., Мицель А.А. Многопродуктовая модель оценки эффективности безопасной деятельности предприятий	107
Буймов А.Г. Проблема управления учебным поведением недостаточно мотивированных студентов на этапе освоения исследовательских компетенций	114

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Сухоруков М.П. Энергопреобразующая аппаратура высоковольтных систем электропитания космических аппаратов с цифровой системой управления	123
Требования	130

ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Loschilov A.G., Trinh T.T, Malyutin N.D, Malyutin G.A. Synthesis of coupled strip lines with heterogeneous cross-section.....	7
Movchan A.K., Rogozhnikov E.V., Dmitriev E.M., Novichkov S.A., Lakontsev D.V. Calculation of signal attenuation of 5G cellular networks for frequencies of the FR1 band	17
Zhechev Y.S., Ivantsov I.A., Kozinets A.S. Analysis and systematization of external tracing of printed conductors based on a symmetrical structure with modal filtering	24
Kosteletskii V.P. Overview of hybrid filters for protection against conductive interference	37
Bozhkov V.G, Bekezina T.P., Burmistrova V.A schottky barrier diodes based on thermally resistant Ir-GaAs and Pt/Ir-GaAs contacts created by electrochemical deposition	48

CONTROL, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

Kruchinin D.V. Modification of the method for developing combinatorial generation algorithms based on the use of multivariate generating functions and approximations	55
Milko D.S., Dancev A.V., Gorbylev A.L. Knowledge base of the expert system for cyber security threat modeling.....	61
Osintsev A.V., Komnatnov M.E. A method for detecting and correcting errors in memory circuits based on the calculation of the hash sum Method to detect and correct errors in memory circuits based on the calculation of the hash sum	70
Kurtukova A.V., Romanov A.S., Fedotova A.M., Shelupanov A.A. Using machine learning methods and feature selection based on a genetic algorithm in solving the problem of establishing the authorship of a Russian-language text.....	79
Kruglov S.P., Aksamentov D.N. Adaptive control of the overhead crane by the speed of movement of the trolley	86
Solovyov N.A., Valeev A.F. Development of gas production system survivability model in the conditions of well flooding	93
Kataev M.Yu., Lukyanov A.K., Tkachenko P.N. Methods for detecting the opening and freezing times of rivers by protected multispectral satellites data and measurements by the MODIS instrument	101
Alimkhanova A.N., Mitsel A.A. Multi-product model for assessing the effectiveness of the safe operation of enterprises	107
Buymov A.G. The problem of managing the learning behavior of insufficiently motivated students at the stage of mastering research competencies	114

ELECTRICAL ENGINEERING

Sukhorukov M.P. Energy-converting equipment of high-voltage spacecraft power supply systems with a digital control system	123
Manuscript requirements	130

**ЭЛЕКТРОНИКА,
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

УДК 621.372

А.Г. Лоцилов, Т.Т. Чинь, Н.Д. Малютин, Г.А. Малютин

Синтез связанных полосковых линий с гетерогенным диэлектрическим заполнением

На примере связанных полосковых линий (СПЛ) с горизонтально и вертикально расположенными полосковыми проводниками показано решение обратной задачи отыскания относительных диэлектрических проницаемостей по заданному отношению фазовых скоростей синфазных и противофазных волн, распространяющихся в линиях. Погонные емкости определялись как сумма парциальных емкостей в выделенных подобластях полосковой структуры, в которых вычислялась накопленная энергия электрического поля. Приведены примеры синтеза конструкций СПЛ с заданным отношением фазовых скоростей.

Ключевые слова: связанные полосковые линии, горизонтальное и вертикальное расположение полосок, разница фазовых скоростей синфазных и противофазных волн, нахождение диэлектрических проницаемостей подложек.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-7-16

Полосковые линии находят широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре радиолокации, связи, измерений, т.к. позволяют уменьшить массу и габариты узлов и улучшить их технологичность. Связанные полосковые линии (СПЛ) позволяют проектировать широкий спектр устройств СВЧ, поэтому их исследование актуально и в настоящее время. Вопросы теории связанных линий (СЛ), основывающейся на решении обобщенных телеграфных уравнений для одинаковых линий, были рассмотрены в работе [1], в которой введены коэффициенты связи линий по напряжению $K_U = Z_{12}Z^{-1}$ и по току $K_I = Y_{12}Y^{-1}$, где Z и Y – погонное собственное сопротивление и погонная собственная проводимость каждой линии, Z_{12} и Y_{12} – погонные взаимные сопротивление и проводимость линий. В общем случае K_U и K_I не равны. При анализе волн в СЛ в [1] получено четыре значения коэффициентов распространения синфазной (индекс «с») и противофазной (индекс «π») волн:

$$\gamma_{c,\pi} = \sqrt{Z \cdot Y \cdot (1 \pm K_U) \cdot (1 \pm K_I)}. \quad (1)$$

Но неравенство $\gamma_c \neq \gamma_\pi$ не было учтено при анализе матрицы передачи устройств на связанных линиях, т.к. полагалось, что в связанных линиях с ТЕМ-волнами при любой частоте волны движутся с одинаковой скоростью. В [1] также не рассматривался вопрос о реальных конструкциях СЛ, в которых возможны неравенства K_U и K_I .

В работе [2] получена матрица ABCD параметров одинаковых связанных линий в гетерогенной (неоднородной) диэлектрической среде. Неоднородность диэлектрической среды учитывалась введением неравенства электрических длин связанных линий при синфазном и противофазном их возбуждении. Полученные в [2] матричные параметры СЛ использованы для анализа эквивалентных схем нескольких секций, рассмотренных ранее [3]. В [2] было показано, что частотные характеристики известных схем на основе СЛ [3], которые ранее счи-

тались всепропускающими, вследствие неравенства электрических длин синфазного и противофазного типов колебаний существенно изменяются вследствие появления резонансов. Отмечено, что причиной изменения частотных характеристик схем является неоднородность диэлектрического заполнения в поперечном сечении связанных линий.

Дальнейший прогресс в исследовании связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью обозначился с публикацией работ [4–6]. В этих статьях незначительно отличающимися способами решена задача вычисления матричных параметров связанных линий в неоднородной диэлектрической среде и с неодинаковыми линиями.

Практическое применение СЛ с неоднородным диэлектрическим заполнением стимулировало поиск и создание новых разновидностей конструкций связанных полосковых линий. Цели создания таких конструкций были подчас диаметрально противоположны. Для построения направленных ответвителей авторы публикаций стремились сблизить фазовые скорости синфазных и противофазных волн

$$v_c = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{rec}}} \text{ и } v_\pi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{rep}}},$$

где c – скорость света; ϵ_{rec} , ϵ_{rep} – относительные эффективные диэлектрические проницаемости синфазной и противофазной мод. Это позволяло избежать отрицательного влияния интерференции волн в связанных линиях, которая сопровождается резонансными явлениями и снижает развязку [7–9].

Другое направление состоит в поиске оптимальной степени неравенств v_c и v_π для решения задач улучшения частотно-селективных характеристик устройств на основе СЛ [10, 11], создании устройств защиты аппаратуры от коротких импульсов с помощью модальных фильтров [12, 13], транснаправленных ответвителей [14, 15], традиционных направленных ответвителей [16], фильтров [17], корректоров ГВЗ [18]. Во всех перечисленных рабо-

тах соотношение фазовых скоростей v_c/v_π находится по задаваемым значениям относительных диэлектрических проницаемостей материалов подложек при определенных размерах поперечного сечения связанных полосковых линий. Значения относительных диэлектрических проницаемостей подложек выбираются из весьма ограниченного набора проницаемостей имеющихся фольгированных материалов или подложек.

В настоящее время в связи с развитием аддитивных технологий появилась возможность печати диэлектрических материалов с наперед заданными свойствами [19–24], используя разные материалы и добавки к ним в процессе формирования слоев диэлектрического наполнения. Кроме того, практически не ограничена форма конструкции печатаемого элемента, что может быть использовано для достижения заданного отношения v_c/v_π .

Цель настоящей работы состоит в решении обратной задачи отыскания относительных диэлектрических проницаемостей подложек связанных полосковых линий по заданному отношению фазовых скоростей синфазных и противофазных волн v_c/v_π , распространяющихся в СПЛ. Для достижения поставленной цели решается обратная задача отыскания диэлектрических проницаемостей материалов подложек по заданному отношению v_c/v_π и значениям других вторичных параметров СЛ.

Конструкции и модель связанных линий

Для решения поставленной задачи и отработки метода отыскания диэлектрических проницаемостей гетерогенной в поперечном сечении полосковой структуры нами взята конструкция связанных полосковых линий с поперечным сечением, показанном на рис. 1.

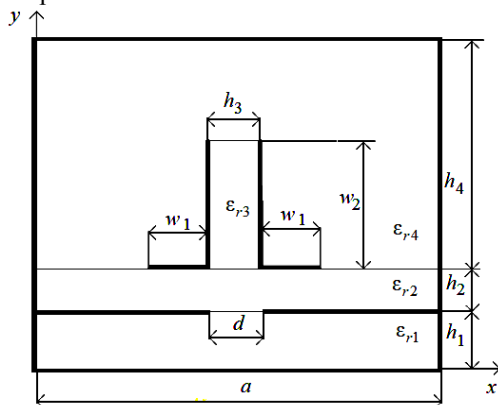


Рис. 1. Поперечное сечение связанных полосковых линий с вертикально расположенной подложкой и зазором в заземляемом основании

Эта конструкция представляет модификацию связанных полосковых линий с вертикально расположенной подложкой (VIP), предложенных и исследованных в работах [16, 17]. Наличие зазора позволяет уменьшить собственные емкости горизонтально расположенных полосок и тем самым увеличить характеристическое сопротивление при синфазном

возбуждении проводников. Наряду с этим появляется дополнительная возможность варьирования степенью неуравновешенности электромагнитной связи. Модификация VIP с зазором в заземляемом основании была применена для построения С-секции с неуравновешенной электромагнитной связью в корректорах группового времени запаздывания [18, 25]. В работах [14–17] рассмотрен расчет первичных и вторичных параметров СПЛ с вертикальной подложкой различными методами при заданных геометрических размерах и свойствах подложек. Исходными данными могут быть вторичные параметры в виде характеристических сопротивлений синфазного Z_{0c} и противофазного $Z_{0\pi}$ возбуждения, а также коэффициенты емкостной k_C и индуктивной k_L связи, аналогичные по смыслу коэффициентами K_U и K_I и определяющие отношение фазовых скоростей синфазной и противофазной волн [26]:

$$\frac{v_c}{v_\pi} = \sqrt{\frac{(1-k_L)(1+k_C)}{(1+k_L)(1-k_C)}}. \quad (2)$$

Рассматриваемые связанные линии с поперечным сечением по рис. 1 обладают следующими отличительными особенностями.

1. Составляющие погонных емкостей полосок, выполненных на горизонтально и вертикально ориентированных подложках, в различной степени зависят от размеров w_1 и w_2 при прочих равных условиях. Это позволяет относительно независимо изменять частичные емкости полосковой структуры при вариации w_1 и w_2 .

2. Наличие зазора в заземляемом основании и воздушного промежутка между ним и экраном снижает собственные частичные емкости преимущественно горизонтальных полосок с размером w_1 .

3. Ортогональное расположение диэлектрических подложек и соответственно полосок с размерами w_1 и w_2 при изменении относительных диэлектрических проницаемостей ϵ_{r2} и ϵ_{r3} позволяет в различной степени изменять емкостные коэффициенты C_{11} и C_{12} , следовательно, и v_c/v_π [14, 15], или отношение погонных задержек мод, как показано в [27].

Отмеченные особенности СПЛ (см. рис. 1) исследованы нами при изменении размеров w_1 и w_2 . Расчет первичных параметров проводился методом сеток [28]. При этом ставилась задача вне зависимости от выбранного метода (как инструментария) обосновать алгоритм синтеза ϵ_{r2} и ϵ_{r3} физически реализуемой конструкции поперечного сечения СПЛ, позволяющей получать заданное неравенство фазовых скоростей нормальных волн v_c/v_π при ограничениях на вторичные параметры. Заметим, что выбор метода расчета параметров по заданным размерам имеет подчиненное значение.

Расчет электрического поля при синфазном и противофазном возбуждении связанных полосок

(см. рис. 1) выполнялся путем перехода от дифференциального уравнения Лапласа к конечно-разностной аппроксимации и отыскания электрического поля с помощью итерационной процедуры на ПЭВМ с погрешностью 10^{-6} при количестве узлов 125×95 . Результаты расчета в виде эквипотенциальных линий при синфазном и противофазном возбуждении связанных полосок приведены на рис. 2 и 3.

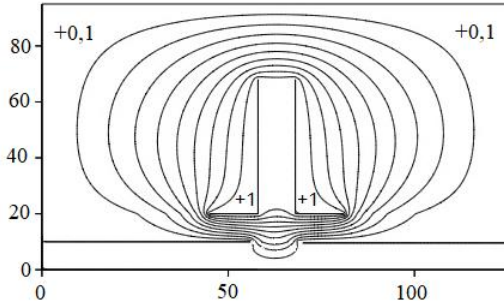


Рис. 2. Эквипотенциальные линии электрического поля при синфазном возбуждении горизонтальных и вертикальных полосок связанных линий

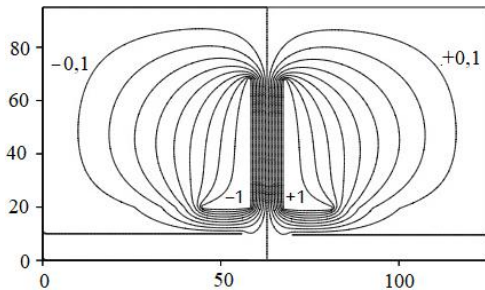


Рис. 3. Эквипотенциальные линии электрического поля при противофазном возбуждении горизонтальных и вертикальных полосок связанных линий

При этом взяты следующие размеры поперечного сечения полосковых линий и относительные диэлектрические проницаемости: $w_1=1,0$ мм, $w_2=3,8$ мм, $h_1=h_2=h_3=0,8$ мм, $h_4=6$ мм, $\epsilon_{r1}=\epsilon_{r4}=1,0$, $w_1=1,0$ мм, $d=1,0$ мм. В результате решения конечно-разностных уравнений для потенциалов $U_{i,j}$ в узлах сетки вычислялись проекции электрического поля E_x и E_y на оси x и y . Затем для синфазного и противофазного возбуждений находилась полная энергия, запасенная в электрическом поле (3)

$$WE = \sum_{i=1}^{\max(i)-1} \sum_{j=1}^{\max(j)-1} \Delta WE_{i,j}, \quad (3)$$

где $\Delta WE_{i,j}$ – энергия, запасенная в элементе $\Delta x \times \Delta y$. Вычисление $\Delta WE_{i,j}$ проводится по выражению (4):

$$\Delta WE_{i,j} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{4} \cdot \left[(U_{i,j} - U_{i+1,j+1})^2 + (U_{i+1,j} - U_{i,j+1})^2 \right], \quad (4)$$

где ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость элемента $\Delta x \times \Delta y$; $U_{i,j}$ – потенциал в узле i, j ; $U_{i+1,j}$, $U_{i,j+1}$, $U_{i+1,j+1}$ – потенциалы в узлах элемента $\Delta x \times \Delta y$.

При вычислении полной энергии WE внутренняя область полосковой структуры разбивается на подобласти Ω_m с номерами $m=1, \dots, 6$, в которых относительные диэлектрические проницаемости ϵ_{rm} ($m=1, \dots, 6$) постоянны. Подобласти Ω_m , в которых вычисляются составляющие энергии WE_1, \dots, WE_6 , показаны на рис. 4. WE_1, \dots, WE_6 определяются следующим образом:

$$WE_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1}}{4} \cdot \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j=1}^{H1-1} (E_x^2 + E_y^2), \quad (5.1)$$

$$WE_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}{4} \cdot \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j=H1+1}^{H1+H2} (E_x^2 + E_y^2), \quad (5.2)$$

$$WE_3 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r3}}{4} \cdot \sum_{i=T2}^{I-1} \sum_{j=H1+H2}^{H1+H2+W2-1} (E_x^2 + E_y^2), \quad (5.3)$$

$$WE_4 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r4}}{4} \cdot \sum_{i=1}^{T2-1} \sum_{j=H1+H2}^{J-1} (E_x^2 + E_y^2), \quad (5.4)$$

$$WE_5 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r5}}{4} \cdot \sum_{i=T4+1}^{I-1} \sum_{j=H1+H2}^{J-1} (E_x^2 + E_y^2), \quad (5.5)$$

$$WE_6 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r6}}{4} \cdot \sum_{i=T2}^{T4} \sum_{j=H1+H2+W2+1}^{J-1} (E_x^2 + E_y^2). \quad (5.6)$$

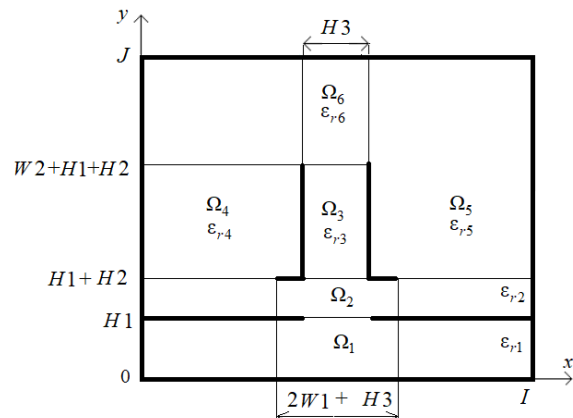


Рис. 4. Разбиение поперечного сечения VIP на подобласти (указаны целые значения координат на сетке)

В выражениях (5.1)–(5.6) пределы суммирования содержат координаты i, j границ подобластей $\Omega_1, \dots, \Omega_6$, получаемые после дискретизации поперечного сечения полосковой структуры. Сумма квадратов проекций вектора напряженности электрического поля на оси x и y вычисляется так:

$$E_x^2 + E_y^2 = (U_{i,j} - U_{i+1,j+1})^2 + (U_{i+1,j} - U_{i,j+1})^2. \quad (6)$$

Формулы (5.1)–(5.6) используются при вычислении матрицы погонных емкостей и индуктивностей связанных линий. Для этого потенциалы на

токонесущих полосках задаются равными +1, +1 при синфазном возбуждении и -1, +1 при противофазном возбуждении. Затем решается уравнение Лапласа в конечно-разностном виде и определяется зависимость $U_{i,j}$. Для синфазного возбуждения рассчитываются распределение потенциалов $U_{i,j}^c$ при заполнении диэлектриками с относительными диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_{r1}, \dots, \varepsilon_{r4}$ и потенциалы $U_{i,j}^c(1)$ при воздушном заполнении. Процедура повторяется для противофазного возбуждения связанных полосок, в результате чего получается $U_{i,j}^\pi$ и $U_{i,j}^\pi(1)$. Для каждого указанного распределения потенциалов в поперечном сечении полосковой структуры рассчитываются $WE_{1, \dots, 6}$. Снабдим их такими же индексами соответствия синфазному и противофазному возбуждению и состоянию диэлектрического заполнения:

WE_m^c – накопленная энергия при синфазной моде при заполнении диэлектриками с $\varepsilon_{r1}, \dots, \varepsilon_{r4}$;

$WE_m^c(1)$ – накопленная энергия для синфазной моды, заполнение воздухом;

WE_m^π – накопленная энергия для противофазной моды, заполнение диэлектриками с $\varepsilon_{r1}, \dots, \varepsilon_{r4}$;

$WE_m^\pi(1)$ – накопленная энергия для противофазной моды, заполнение воздухом.

Погонная емкость одной полоски для синфазной моды при одинаковых размерах связанных линий и заполнении диэлектриками с $\varepsilon_{r1}, \dots, \varepsilon_{r4}$ определяется так:

$$C^c = \sum_{m=1}^6 WE_m^c. \quad (7)$$

При заполнении воздухом погонная емкость при синфазном возбуждении находится следующим образом:

$$C^c(1) = \sum_{m=1}^6 WE_m^c(1). \quad (8)$$

Погонные емкости при противофазном возбуждении находятся аналогично

$$C^\pi = \sum_{m=1}^6 WE_m^\pi, \quad (9)$$

$$C^\pi(1) = \sum_{m=1}^6 WE_m^\pi(1). \quad (10)$$

Формулы (7)–(10) позволяют представить погонные емкости C^c , $C^c(1)$, C^π , $C^\pi(1)$ как суммы частичных емкостей, поскольку выражения (5.1)–(5.6) получены при суммировании $\Delta WE_{i,j}$ в пределах подобластей, каждая из которых представляет поперечное сечение сложного конденсатора.

Запишем теперь коэффициенты матрицы емкостей рассматриваемых связанных линий

$$C_{11} = C_{22} = 0,5 \cdot \left(\sum_{m=1}^6 WE_m^\pi + \sum_{m=1}^6 WE_m^c \right), \quad (11)$$

$$C_{12} = 0,5 \cdot \left(\sum_{m=1}^6 WE_m^\pi - \sum_{m=1}^6 WE_m^c \right). \quad (12)$$

Коэффициенты матрицы емкостей при воздушном заполнении записываются на основе (8) и (10)

$$C_{11}(1) = C_{22}(1) = 0,5 \cdot \left(\sum_{m=1}^6 WE_m^\pi(1) + \sum_{m=1}^6 WE_m^c(1) \right), \quad (13)$$

$$C_{12}(1) = 0,5 \cdot \left(\sum_{m=1}^6 WE_m^c(1) - \sum_{m=1}^6 WE_m^\pi(1) \right). \quad (14)$$

Записав матрицу погонных емкостей при воздушном заполнении, находим матрицу погонных индуктивностей [26]

$$L = \frac{1}{c^2} \begin{bmatrix} C_{11}(1) & C_{12}(1) \\ C_{12}(1) & C_{22}(1) \end{bmatrix}^{-1}, \quad (15)$$

где c – скорость света.

Далее определим относительные эффективные диэлектрические проницаемости при синфазном возбуждении

$$\varepsilon_{rec} = \frac{\sum_{m=1}^6 WE_m^c}{\sum_{m=1}^6 WE_m^c(1)} \quad (16)$$

и для противофазной волны

$$\varepsilon_{rep} = \frac{\sum_{m=1}^6 WE_m^\pi}{\sum_{m=1}^6 WE_m^\pi(1)}. \quad (17)$$

Обозначим $WE_m^{c,\pi} / \varepsilon_{rm} = \overline{WE}_m^{c,\pi}$. Допустим, что ε_{rec} и ε_{rep} известны. Тогда (16) и (17) позволяют записать систему уравнений, из которой устанавливается связь между относительными диэлектрическими проницаемостями ε_{rm} ($m=1, \dots, 6$), эффективными диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_{rec,\pi}$ и размерами поперечного сечения, так как $\overline{WE}_m^{c,\pi}$, $WE_m^{c,\pi}(1)$ зависят от отношения поперечных размеров полосковой структуры. Если $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r4} = \varepsilon_{r5} = \varepsilon_{r6} = 1$ (заполнение воздухом), тогда получаем систему двух уравнений для определения ε_{r2} , ε_{r3} горизонтально и вертикально расположенных подложек (см. рис. 4):

$$\varepsilon_{r2} \overline{WE}_2^c + \varepsilon_{r3} \overline{WE}_3^c = \varepsilon_{rec} \sum_{m=1}^6 WE_m^c(1) - \left(\overline{WE}_1^c + \sum_{m=4}^6 \overline{WE}_m^c \right), \quad (18a)$$

$$\varepsilon_{r2} \overline{WE}_2^\pi + \varepsilon_{r3} \overline{WE}_3^\pi = \varepsilon_{rep} \sum_{m=1}^6 WE_m^\pi(1) - \left(\overline{WE}_1^\pi + \sum_{m=4}^6 \overline{WE}_m^\pi \right). \quad (18б)$$

Отсюда

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{r2} \\ \varepsilon_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{WE}_2^c & \overline{WE}_3^c \\ \overline{WE}_2^\pi & \overline{WE}_3^\pi \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{rec} \sum_{m=1}^6 WE_m^c(1) - A \\ \varepsilon_{rep} \sum_{m=1}^6 WE_m^\pi(1) - B \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где

$$A = \overline{WE}_1^c + \sum_{m=4}^6 \overline{WE}_m^c; \quad B = \overline{WE}_1^\pi + \sum_{m=4}^6 \overline{WE}_m^\pi.$$

При изменении ε_{rec} и ε_{rep} значения входящих в (19) других параметров не изменяются, т.к. размеры поперечного сечения полосковой структуры считаем неизменными. Но мы знаем, что вариация ε_{r2} и ε_{r3} приводит к изменению картины электрического поля. Поэтому выражение (19) справедливо, строго говоря, только при малом изменении электрического поля вследствие изменения ε_{rec} и ε_{rep} . Тем не менее, как будет показано далее на ряде примеров, расчет ε_{r2} и ε_{r3} по (19) приводит к поставленной цели получения заданного отношения v_c/v_π в результате двух-трех итераций. При этом практически всегда решения, получаемые из (19), дают правильное направление изменения диэлектрических проницаемостей и позволяют сделать вывод о реализуемости конструкции связанных линий по критерию $1 \leq \varepsilon_{r2}, 1 \leq \varepsilon_{r3}$.

Для тестирования полученных соотношений предпринято решение прямой и обратной задачи. Прямая задача состояла в задании конструктивных размеров связанных полосковых линий: $w_1 = 1,0$ мм, $w_2 = 3,8$ мм, $h_4 = 6$ мм, $h_1 = h_2 = h_3 = 0,8$ мм, $a = 10$ мм, $b = 6$ мм, $d = 0$ мм, относительных диэлектрических проницаемостей: $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r4} = \varepsilon_{r5} = \varepsilon_{r6} = 1$, $v_c/v_\pi = 1,235$. Был проведен расчёт первичных и вторичных параметров СПЛ при выбранной базовой модели на подложках с $\varepsilon_{r2} = \varepsilon_{r3} = 2,68$. В результате получены ε_{rec} , ε_{rep} и $v_c/v_\pi = 1,235$. Обратная задача – определение ε_{r2} , ε_{r3} по формуле (19), содержащей найденные при решении прямой задачи значения парциальных энергий. Получено полное совпадение результатов расчета v_c/v_π , что подтверждает корректность приводимых выражений.

Знание матриц погонных емкостей, индуктивностей и эффективных диэлектрических проницаемостей позволяет определить характеристические сопротивления синфазной и противofазной волн [26]

$$Z_{0c} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{rec}}}{\varepsilon_0 \cdot c \cdot \sum_{m=1}^6 \overline{WE}_m^c}, \quad (20a)$$

$$Z_{0\pi} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{rep}}}{\varepsilon_0 \cdot c \cdot \sum_{m=1}^6 \overline{WE}_m^\pi}. \quad (20б)$$

Очевидно, что при изменении $\varepsilon_{rec,\pi}$ и соответственно ε_{r2} и ε_{r3} при расчете по формуле (19) будет происходить изменение $Z_{0c,\pi}$, как это следует из (20). Задав $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r4} = 1$, Z_{0c} и $Z_{0\pi}$, рассматривая

(20) как систему из двух уравнений с неизвестными ε_{r2} и ε_{r3} , получаем по аналогии с (19) матрицу

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{r2} \\ \varepsilon_{r3} \end{bmatrix} = ZW^{-1} \cdot FE, \quad (21)$$

$$ZW = \begin{bmatrix} Z_{0c} \cdot c \cdot \varepsilon_0 \cdot \overline{WE}_2^c & Z_{0c} \cdot c \cdot \varepsilon_0 \cdot \overline{WE}_3^c \\ Z_{0\pi} \cdot c \cdot \varepsilon_0 \cdot \overline{WE}_2^\pi & Z_{0\pi} \cdot c \cdot \varepsilon_0 \cdot \overline{WE}_3^\pi \end{bmatrix}^{-1}, \quad (22)$$

$$FE = \begin{bmatrix} \sqrt{\varepsilon_{rec}} - Z_{0c} \cdot c \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\overline{WE}_1^c + \sum_{m=4}^6 \overline{WE}_m^c \right) \\ \sqrt{\varepsilon_{rep}} - Z_{0\pi} \cdot c \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\overline{WE}_1^\pi + \sum_{m=4}^6 \overline{WE}_m^\pi \right) \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Выражения (19) и (21) могут давать не совпадающие результаты, если задаваться произвольными значениями $\varepsilon_{rec,\pi}$ и $Z_{0c,\pi}$. Это связано с тем, что вариация $\varepsilon_{rec,\pi}$ ведет к изменению $\overline{WE}_m^{c,\pi}$ при неизменных размерах поперечного сечения. Поэтому для одновременного попадания в допустимую окрестность значений $\varepsilon_{rec,\pi}$ целесообразно исследовать зависимость $\overline{WE}_m^{c,\pi}$ от размеров поперечного сечения w_1, w_2 .

Были взяты следующие исходные параметры связанных полосковых линий: $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = \varepsilon_{r4} = 1$, $\varepsilon_{r3} = 16$, $h_1 = 0,8$ мм, $h_2 = 0,5$ мм, $h_3 = 1,0$ мм, $h_4 = 8,0$ мм, $d = 0$, $a = 10$ мм. Размеры полосок w_1, w_2 взяты такие: $w_1 = 2,3$ мм, $w_2 = 0,5, \dots, 5,0$ мм. На рис. 5 и 6 показаны зависимости $\sum_{m=1}^6 \overline{WE}_m^\pi(1)$ и $\overline{WE}_3^\pi(1)$ от w_2 при воздушном

заполнении поперечного сечения рассматриваемой связанной линии и противofазном возбуждении полосок. Рисунки 7 и 8 иллюстрируют зависимости $\sum_{m=1}^6 \overline{WE}_m^\pi$ и \overline{WE}_m^π от w_2 при значении диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{r3} = 16$ и воздушном заполнении остальных подобластей поперечного сечения рассматриваемых связанных линий и противofазном возбуждении полосок.

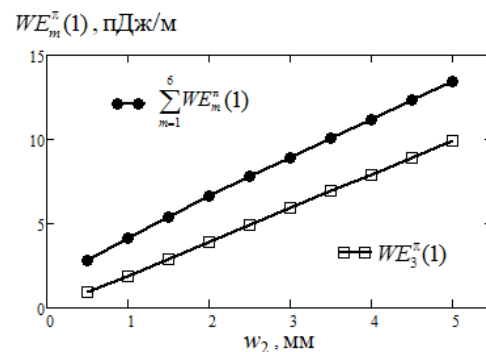


Рис. 5. Зависимости $\sum_{m=1}^6 \overline{WE}_m^\pi(1)$ и $\overline{WE}_m^\pi(1)$ от w_2 и $\varepsilon_{r3} = 16$

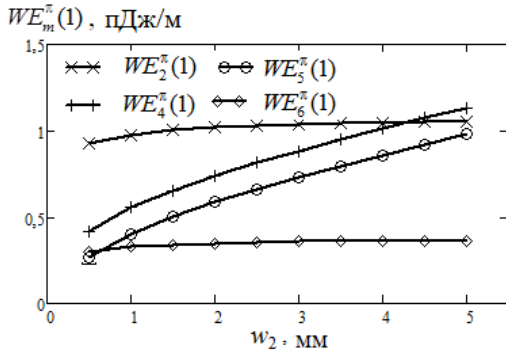


Рис. 6. Зависимости WE_m^π ($m=2, 4, 5, 6$) от w_2 при $\epsilon_{r3}=1$

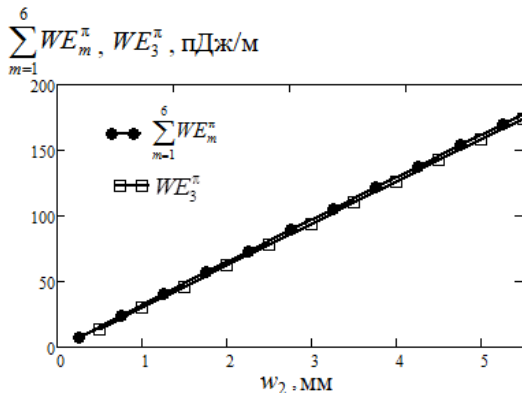


Рис. 7. Зависимости $\sum_{m=1}^6 WE_m^\pi$ и WE_3^π от w_2 при $\epsilon_{r3}=16$

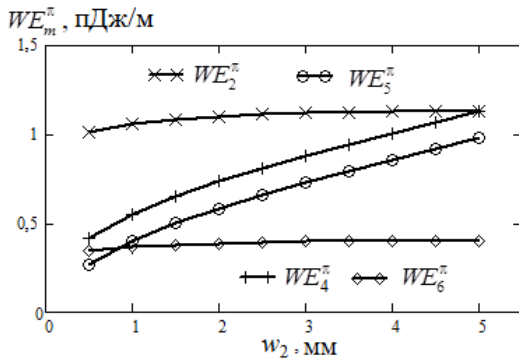


Рис. 8. Зависимости WE_m^π от w_2 при $\epsilon_{r3}=16$

Анализ графиков рис. 5–8 показывает, что доминирующий вклад в суммарную емкость противофазного типа колебаний вносит емкость между вертикально расположенными полосками (коэффициент WE_3^π). Получены функции, аппроксимирующие зависимости $\sum_{m=1}^6 WE_m^\pi(1)$, $WE_3^\pi(1)$, $\sum_{m=1}^6 WE_m^\pi$ и WE_3^π от w_2 (24)–(28):

$$\sum_{m=1}^6 WE_m^\pi(1) \approx f_0(w_2),$$

$$f_0(w_2) = [1,443 \quad 2,852 \quad -0,161 \quad 0,014] \cdot [wr], \quad (24)$$

$$WE_3^\pi(1) \approx f_1(w_2),$$

$$f_1(w_2) = [-0,102 \quad 2,018 \quad -0,005 \quad 0,0005] \cdot [wr], \quad (25)$$

$$\sum_{m=1}^6 WE_m^\pi \approx f_2(w_2),$$

$$f_2(w_2) = [-0,548 \quad 33,197 \quad -0,266 \quad 0,025] \cdot [wr], \quad (26)$$

$$WE_3^\pi \approx f_3(w_2),$$

$$f_3(w_2) = [-2,231 \quad 32,386 \quad -0,118 \quad 0,012] \cdot [wr], \quad (27)$$

$$[wr] = [1 \quad w_2 \quad w_2^2 \quad w_2^3]^T. \quad (28)$$

Обратившись к выражению (19), найдем WE_3^π по задаваемому $Z_{0\pi}$

$$WE_3^\pi = \frac{1}{Z_{0\pi} \epsilon_0 c} \left[\epsilon_{re\pi} - \epsilon_0 Z_{0\pi} c \left(\sum_{m=3}^6 WE_m^\pi + WE_1^\pi \right) \right]. \quad (29)$$

Теперь можно воспользоваться (27) и найти ширину полосок w_2 , расположенных на вертикальной подложке по заданному $Z_{0\pi}$. Это сводится к решению уравнения

$$32,386 \cdot w_2 - 0,118 \cdot w_2^2 + 0,012 \cdot w_2^3 - 2,231 = WE_3^\pi. \quad (30)$$

Приближенное значение w_2 получается из (30), если не учитывать коэффициенты при w_2^2 и w_2^3 :

$$w_2 \approx (WE_3^\pi + 2,231) / 32,386. \quad (31)$$

Уравнение (30) или приближенная формула (31) позволяют определить w_2 при изменении $Z_{0\pi}$.

Пример 1. Проведенный расчет первичных и вторичных параметров связанных линий при $w_2 = 2$ мм и исходных данных, указанных выше, дал значение $Z_{0\pi} = 18,167$ Ом. Затем сделана корректировка $Z_{0\pi} = 20$ Ом, из (29) определено $WE_3^\pi = 56,199$ пДж/м и в результате решения (30) получено $w_2 = 1,817$ мм. Приближение по (31) дало значение $w_2 = 1,804$ мм.

Методика и результаты синтеза конструкций с заданным отношением фазовых скоростей синфазных и противофазных волн

Синтезированы конструкции с разными отношениями фазовых скоростей синфазных и противофазных волн. За основу взята конструкция с размерами и относительными диэлектрическими проницаемостями $w_1 = 0$, $a = 10$ мм, $h_4 = 6$ мм, $h_1 = h_2 = h_3 = 1,0$ мм, $d = 0$, $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r4} = 1,0$. При синтезе делалось, как правило, две итерации. Их суть сводилась к тому, чтобы на первом шаге определить путем применения формул (19), (20) диэлектрические проницаемости ϵ_{r2} и ϵ_{r3} , обеспечивающие заданное v_c/v_π в пределах 0,8...2,5. После получения первого приближения вновь рассчитывались ϵ_{r2} и ϵ_{r3} по (16), (17) и определялись первичные и вторичные параметры.

Пример 2. Задано $v_c/v_\pi = 0,8$. При первой итерации, используя базовые параметры и взяв

$\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 2,68$, применяем (19) и приходим к выводу о том, относительные диэлектрические проницаемости должны удовлетворять неравенству $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r3}$. Берем $\epsilon_{r2} = 16$, $\epsilon_{r3} = 2,6$. Расчет первичных параметров при $w_2 = 2,5$ мм дал значение $v_c/v_\pi = \sqrt{3,572/5,295} = 0,821$.

Вторая итерация проведена изменением $\epsilon_{rec} = 5,58$. Получены необходимые $\epsilon_{r2} = 17,237$, $\epsilon_{r3} = 2,414$. Для расчета взяты $\epsilon_{r2} = 17,20$, $\epsilon_{r3} = 2,42$. Результат

$$\epsilon_{rec} = 5,571, \epsilon_{reп} = 3,567, v_c/v_\pi = 0,8,$$

$$C = \begin{bmatrix} 177,5 & -61,47 \\ -61,47 & 177,5 \end{bmatrix}, \text{ пФ/м,}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0,3498 & 0,1839 \\ 0,1839 & 0,3498 \end{bmatrix}, \text{ мкГн/м.}$$

Пример 3. Задано $v_c/v_\pi = 1,0$. При первой итерации, используя базовые параметры и взяв $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 2,68$, $w_2 = 3$, применяем (19) и приходим к выводу о том, что относительные диэлектрические проницаемости должны удовлетворять неравенству $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r3}$, и условие выравнивания v_c и v_π выполняется, если $\epsilon_{r2}/\epsilon_{r3} = 4,738/2,289$.

Вторая итерация проведена при $\epsilon_{r2} = 5,0$, $\epsilon_{r3} = 2,4$, но потребовалась и третья итерация после уточнения с помощью выражения (19). При этом достигается отношение $v_c/v_\pi = 1,004$ при $\epsilon_{rec} = 2,35$, $\epsilon_{reп} = 2,37$, а первичные параметры в виде матриц емкостей и индуктивностей получаются следующими:

$$C = \begin{bmatrix} 117,6 & -65,18 \\ -65,18 & 117,6 \end{bmatrix}, \text{ пФ/м,}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0,3212 & 0,1771 \\ 0,1771 & 0,3212 \end{bmatrix}, \text{ мкГн/м.}$$

Реализация конструкции связанных линий с синтезированными размерами неудобна для монтажа вертикальной подложки. Чтобы была возможность улучшить технологичность сборки, желательно, чтобы $w_1 > 0$. Тогда возможно соединение вертикально расположенных полосок с горизонтальными полосками с помощью пайки (см. рис. 1, [16–18]). Однако увеличение w_1 ведет к росту собственной емкости на заземляемое основание и уменьшению Z_{0c} . Компенсировать нежелательные изменения можно увеличением зазора d .

Нами были рассчитаны зависимости v_c/v_π и $\sqrt{Z_{0\pi} \cdot Z_{0c}}$ от d при $w_1 = 0,5$ мм и остальных полученных после второй итерации параметрах. Аппроксимация функций $v_c/v_\pi \approx f_4(d)$ и $\sqrt{Z_{0\pi} \cdot Z_{0c}} \approx f_5(d)$ получена в виде полиномов

$$f_4(d) = [0,944 \quad 1,49 \cdot 10^{-3} \quad 0,026 \quad -3,38 \cdot 10^{-3}] \times [wd], \quad (32)$$

$$f_5(d) = [44,129 \quad -0,237 \quad 1,803 \quad -0,231] \cdot [wd], \quad (33)$$

$$[wd] = [1 \quad d_2 \quad d_2^2 \quad d_2^3]^T. \quad (34)$$

Совместное решение уравнений (32), (33) позволило найти зазор $d = 1,7$ мм и после повторного расчета по программе NETEPSILON получить $v_c/v_\pi = 1,012$ и приемлемое согласование при $\sqrt{Z_{0\pi} \cdot Z_{0c}} = 48,2$ Ом.

Пример 4. Задано $v_c/v_\pi = 1,7$. Поставлено условие применения диэлектрика одного типа толщиной $h_3 = 1,5$ и с проницаемостью материала $\epsilon_{r3} = 5,0$. Остальное пространство – воздух. Волновое сопротивление для противофазной волны должно быть $Z_{0\pi} = 25$ Ом, $\sqrt{Z_{0\pi} \cdot Z_{0c}} = 50$ Ом. В качестве базового первичного варианта выбрана конструкция с размером вертикально расположенных полосок $w_2 = 3$ мм. После первой итерации получено $v_c/v_\pi = 1,642$, Ом. Второй шаг делался обращением к формуле (27), которая позволила уточнить $w_2 = 4$ мм и в конечном итоге получить $v_c/v_\pi = 1,702$, $Z_{0\pi} = 24,79$ Ом, $\sqrt{Z_{0\pi} \cdot Z_{0c}} = 50,228$ Ом.

Пример 5. В качестве базовой конструкции взята полосковая структура с $w_1 = 0$, $w_2 = 2$ мм, $h_1 = 0$, $h_2 = 0,45$ мм, $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = \epsilon_{r4} = 1$. Поставлена задача получить на основе этой конструкции отношение $v_c/v_\pi \geq 2,5$, используя оценки на основе выражений (19), (20). При этом одновременно должно быть выполнено условие $\sqrt{Z_{0\pi} \cdot Z_{0c}} \approx 50$ Ом. Из проведенного анализа (см. предыдущий пример) следует, что $v_c/v_\pi > 1$ можно получить только если $\epsilon_{r3} > \epsilon_{r2}$. В качестве первой итерации было взято $\epsilon_3 = 20,0$, что в предельном случае обеспечивает $\epsilon_{reп} = \sqrt{20} = 4,47$, и при $\epsilon_{rec} = 1,5$ получаем $v_c/v_\pi = 3,65$. Однако расчет показал, что при выбранных параметрах полосковой структуры имеем $v_c/v_\pi = 2,947$ и $\sqrt{Z_{0\pi} \cdot Z_{0c}} = 42,176$. Вторая итерация проведена сначала обращением к (21) при $Z_{0c} = 133,57$ Ом, $Z_{0\pi} = 18,73$ Ом и расчетом $[\epsilon_{r2}, \epsilon_{r3}] = [0,703, 16,871]$. Этот результат означает, что при выбранной $\epsilon_3 = 20,0$ и заданных других параметрах физическая реализация условия $\sqrt{Z_{0\pi} \cdot Z_{0c}} \approx 50$ Ом невозможна, т.к. ϵ_{r2} нереализуема. Но одновременно с этим расчет указывает на необходимость уменьшения ϵ_{r3} . Было взято $\epsilon_{r3} = 16$, получен физически реализуемый вариант и $v_c/v_\pi = 2,704$, $\sqrt{Z_{0\pi} \cdot Z_{0c}} = 44,959$ Ом.

Заключение

Представленный подход, суть которого состоит в решении обратных задач отыскания диэлектрических проницаемостей и размеров полосок на основе численного решения уравнения Лапласа и определения накопленной энергии электрического поля в выделенных подобластях, применим к другим типам связанных полосковых линий. Находимые значения относительных диэлектрических проницаемостей подложек могут не соответствовать проницаемостям производимых фольгированных материалов. Так, в примере 2 показана необходимость получения относительных диэлектрических проницаемостей $\epsilon_{r2} = 17,2$, $\epsilon_{r3} = 2,42$.

Материалы с точно такими параметрами можно изготовить с помощью аддитивных технологий многокомпонентной печати разными диэлектриками с заранее заданным процентным содержанием составляющих [23]. Другой возможный способ – использовать многослойные подложки из разных доступных диэлектриков с разной толщиной и разными диэлектрическими проницаемостями, в том числе получаемых с помощью принтерных технологий. В этом случае представленный путь решения задачи получения заданного отношения фазовых скоростей при ограничении на другие параметры также применим.

Таким образом, возможности проведенного в настоящей работе синтеза СПЛ по критерию заданного отношения v_c/v_π делают целесообразной новую задачу разработки технологического процесса изготовления диэлектрических материалов с заданной диэлектрической проницаемостью аддитивными методами печати.

Представленная методика, на взгляд авторов, также полезна для встраивания в алгоритм оптимизации при решении схожих задач синтеза полосковых структур при заданных v_c/v_π и $\sqrt{Z_{0\pi} \cdot Z_{0c}}$, так как основывается на аналитических соотношениях при выборе направления поиска необходимых диэлектрических проницаемостей.

Публикация выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2020-039 от 01.03.20.

Литература

1. Влостовский Е.Г. К теории связанных линий передачи // Радиотехника. – 1967. – Т. 22, № 4. – С. 28–35.
2. Zysman G.I. Coupled Transmission Line Networks in an Inhomogeneous Dielectric Medium / G.I. Zysman, A.K. Johson // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1969. – Vol. 7, No. 10. – P. 753–759.
3. Jones E.M.T. Coupled-strip-transmission line filters and directional couplers / E.M.T. Jones, J.T. Bolljahn // IRE Trans. Microwave Theory Tech. – 1956. – Vol. MTT-4. – P. 75–81.
4. Allen J.L. Non-symmetrical coupled lines in an inhomogeneous dielectric medium // International Journal of Electronics. – 1975. – Vol. 38, No. 3. – P. 337–347.
5. Tripathi V.K. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1975. – Vol. 23, No. 9. – P. 734–739.
6. Воробьев П.А. Квази-Т-волны в устройствах на связанных линиях с неуравновешенной электромагнитной связью / П.А. Воробьев, Н.Д. Малютин, В.Н. Федоров // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, № 9. – С. 1711–1718.
7. March S.L. Phase velocity compensation in parallel-coupled microstrip // Microwave Symposium Digest. – 1982. – P. 410–412.
8. Sheleg B. Broad-band directional couplers using microstrip with dielectric overlays / B. Sheleg, B.E. Spielman // IEEE Trans. Microw. Theory. Tech. – 1974. – Vol. 22, No. 12. – P. 1216–1220.
9. Hammad A.M. Weakly coupled directional coupler with simultaneous wide bandwidth and high directivity / A.M. Hammad, Z.M. Ayaz, H.M. Cheema // Microw Opt Technol Lett. – 2019. – P. 1–4.
10. Belyaev B. Investigation of microstrip high-pass filters based on multimode resonator / B. Belyaev, S. Khodentkov, G. Nazarov, S. Natalia, D. Panin // Proceedings – 2019. Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology. – 2019. – P. 383–386.
11. Belyaev B.A. A highly selective bandpass filter based on suspended substrate resonators with a two-sided stripline pattern / B.A. Belyaev., Y.F. Balva, A.A. Leksikov, E.O. Grushevskii, A.M. Serzhantov // Technical Physics Letters. – 2019. – Vol. 45, No. 5. – P. 485–488.
12. Belousov O. Simulation of the time response in multiconductor microstrip modal filters with separate accounting for losses in conductors and dielectrics / O. Belousov, T.R. Gazizov // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1–5.
13. Samoylichenko M.A. Electrical Characteristics of a Modal Filter with a Passive Conductor in the Reference Plane Cutout / M.A. Samoylichenko, Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2021. – Vol. 63, No. 2. – P. 435–442.
14. Sychev A.N. A novel trans-directional coupler based on vertically installed planar circuit / A.N. Sychev, S.M. Struchkov, V.N. Putilov, N.Y. Rudyi // European Microwave Week 2015: Freedom Through Microwaves, EuMW 2015 // Conference Proceedings; 2015 45th European Microwave Conference Proceedings, EuMC: 45, Freedom Through Microwaves, Paris, 07–10 sept. 2015. – Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2015. – P. 283–286. – DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345755.
15. Sychev N. A transdirectional coupled-line coupler with a vertical insert // N. Sychev, S.M. Struchkov, N.Y. Rudyi // Proc. 25th Int. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology. – 2015 – P. 547–549.
16. Konishi Y. A directional coupler of a vertically installed planar circuit structure / Y. Konishi, I. Awai, Y. Fukuo-ka, M. Nakajima // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1988. – P. 1057–1063.
17. Konishi Y. Newly Proposed Vertically Installed Planar Circuit and its Application / Y. Konishi, I. Awai, Y. Fukuo-ka // IEEE Transactions on Broadcasting. – 1987. – P. 1–7.
18. Malyutin N.D. Wave properties of the group delay correctors based on coupled strip-lines with different inphase and antiphase wave phase velocities / N.D. Malyutin, A. Malyutina, A. Fedorov, A. Loschilov, R. Sharabudinov // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2019. – P. 367–381.
19. Развитие аддитивных принтерных технологий в электронике / Н.Д. Малютин, В.И. Туев, А.Г. Лощилов и

др. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2015. – 69 с.

20. Johann S. Plastic and metal additive manufacturing technologies for microwave passive components up to Kaband / S. Johann, F. William, P. Aurelien // *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. – 2018. – Vol. 10. – P. 772–782.

21. Здрок А.Е. Микрополосковая линия, изготовленная методом плоттерной печати чернилами, содержащими наночастицы серебра. Ее частотные и импульсные характеристики / А.Е. Здрок., Д.В. Шерстюк, А.М. Умаров, С.А. Артищев, А.Г. Лоцилов, Н.Д. Малютин // *Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век*. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 3–8.

22. Туев В.И. Исследование возможностей применения аддитивной принтерной технологии формирования пленок органических и неорганических материалов электроники / В.И. Туев, Н.Д. Малютин, А.Г. Лоцилов, С.А. Артищев, А.Е. Здрок, А.М. Аллануров, А.А. Бомбизов, С.П. Караульных, И.М. Макаров, А.В. Убайчин // *Доклады ТУСУР*. – 2015. – № 4(38). – С. 52–63.

23. Качаев А.А. Перспективы применения аддитивных технологий для получения керамических материалов / А.А. Качаев, А.С. Чайникова, В.А. Воронов, П.Б. Мазалов, Ю.Е. Лебедева // *Аддитивные технологии: настоящее и будущее: матер. VII Междунар. конф.* – М., 2021. – С. 149–159.

24. Смирнов А. Разработка и исследование керамополимерного филамента для 3d-печати методом послойного наплавления / А. Смирнов, П.А. Подрабинник, Е.В. Кузнецова, Р.С. Хмыров, Н.Н. Бабушкин // *Перспективные технологии и материалы: матер. междунар. науч.-практ. конф.* – Севастополь, 2021. – С. 228–232.

25. Дрогалев С.В. Использование С-секции с неуравновешенной электромагнитной связью в корректорах группового времени замедления / С.В. Дрогалев, Н.Д. Малютин // *Радиотехника*. – 1994. – № 12. – С. 30–32.

26. Сычев А.Н. Системы параметров одинаковых связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью / А.Н. Сычев, С.М. Стручков // *Доклады ТУСУР*. – 2014. – № 1(31). – С. 39–50.

27. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. – Томск: Том. гос. ун-т, 2007. – 152 с.

28. Fusco V.F. Microwave circuits. Analysis and Computer-aided Design // Prentice-Hall International. – 1990. – P. 87–129.

Лоцилов Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID ID: 0000-0003-0669-5694
Тел.: +7 (382-2) 51-43-02
Эл. почта: lag@main.tusur.ru

Чинь Тхань То

Аспирант каф. КУДР ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-445-04-86
Эл. почта: thanhvodoi1995@gmail.com

Малютин Николай Дмитриевич

Д-р техн. наук, проф. каф. КУДР ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID ID: 0000-0003-0317-9096
Тел.: +7-913-12-34-56
Эл. почта: ndm@main.tusur.ru

Малютин Георгий Александрович

Студент каф. КУДР ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-953-854-48-48
Эл. почта: mg.mageorge@yandex.ru

Loschilov A.G., Trinh T.T., Malyutin N.D., Malyutin G.A.

Synthesis of coupled strip lines with heterogeneous cross-section

Using the example of coupled strip lines with horizontally and vertically arranged strip conductors, the solution of the inverse problem of finding relative permittivity according to a given ratio of phase velocities of in-phase and antiphase waves propagating in the lines is shown. Per unite capacitances are defined as the sum of partial capacitances in the selected subdomains of the strip structure, in which the accumulated energy of the electric field was calculated. Examples of the synthesis of coupled line structures with a given ratio of phase velocities are shown.

Keywords: coupled strip lines, horizontal and vertical position of the strips, phase velocities difference of synphase and antiphase waves, finding the permittivities of the substrates.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-7-16

References

1. Vlostovsky E.G. [On the theory of coupled transmission lines]. *Radio Engineering*, 1967, T 22, no. 4, pp. 28–35 (in Russ.).
2. Zysman G.I, Johson A.K. Coupled Transmission Line Networks in an Inhomogeneous Dielectric Medium. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1969, vol. 7, no. 10, pp. 753–759.
3. Jones E.M.T, Bolljahn J.T. Coupled-strip-transmission line filters and directional couplers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1956, vol. 4, pp. 75–81.
4. Allen J.L. Non-symmetrical coupled lines in an inhomogeneous dielectric medium. *International Journal of Electronics*, 1975, vol. 38, no. 3, pp. 337–347.
5. Tripathi V.K. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1975, vol 23, no. 9, pp. 734–739.
6. Vorobyov P.A, Malyutin N.D., Fedorov V.N. [Quasi-T-waves in coupled line devices with unbalanced electromagnetic coupling] *Radio Engineering and Electronics*, 1982, t. 27, no. 9, pp. 1711–1718 (in Russ)
7. March S.L. Phase velocity compensation in parallel-coupled microstrip. *In Microwave Symposium Digest*, 1982, pp. 410–412.
8. Sheleg B, Spielman B.E. Broad-band directional couplers using microstrip with dielectric overlays. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1974, vol. 22, no 12, pp. 1216–1220.
9. Hammad A.M, Ayaz Z.M., Cheema H.M. Weakly coupled directional coupler with simultaneous wide bandwidth and highdirectivity. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, pp. 1–4.

10. Belyaev B, Khodenkov S., Nazarov G, Natalia S., Panin D. Investigation of microstrip high-pass filters based on multimode resonator. *Radioelectronics and Information Technology*, 2019, pp. 383–386.

11. Belyaev B.A, Balva Y.F., Leksikov A.A., Grushevskii E.O., Serzhantov A.M. A highly selective bandpass filter based on suspended substrate resonators with a two-sided stripline pattern. *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, no. 5, pp. 485–488.

12. Belousov O, Gazizov T R. Simulation of the time response in multiconductor microstrip modal filters with separate accounting for losses in conductors and dielectrics. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT*, 2018, vol. 2018, pp. 1–5.

13. Samoylichenko M.A, Zhechev Y.S., Kosteletskii V.P., Gazizov T.R. Electrical Characteristics of a Modal Filter with a Passive Conductor in the Reference Plane Cutout. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, vol. 63, no 2, pp. 435–442.

14. Sychev A.N, Struchkov S.M., Putilov V.N., Rudyi N.Y. A novel trans-directional coupler based on vertically installed planar circuit. *Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc*, 2015, pp. 283–286.

15. Sychev N. A, Struchkov S.M., Rudyi N.Y. Transdirectional coupled-line coupler with a vertical insert. *Proceedings of the 25th International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology*, 2015, pp. 547–549.

16. Konishi Y. A, Awai I., Fukuoka Y., Nakajima M. Directional coupler of a vertically installed planar circuit structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1988, pp. 1057–1063.

17. Konishi Y, Awai I., Fukuoka Y. Newly Proposed Vertically Installed Planar Circuit and its Application. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 1987, pp. 1–7.

18. Malyutin N.D, Malyutina A.G., Fedorov A., Loschilov A.G., Sharabudinov R.M. Wave properties of the group delay correctors based on coupled strip-lines with different inphase and antiphase wave phase velocities. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2019, pp. 367–381.

19. Malyutin N.D., Tuev V.I., Loshchilov A.G. *Razvitiye additivnykh printernykh tekhnologiy v elektronike* [Development of additive printer technologies in electronics], Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2015, 69 p. (in Russ)

20. Johann S., William F., Aurelien P., Johann S. Plastic and metal additive manufacturing technologies for microwave passive components up to Kaband *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2018, vol. 10, c. 772–782.

21. Zdrok A.E, Sherstyuk D.V., Umarov A.M., Artishchev S.A., Loschilov A.G., Malyutin N.D. [Microstrip line made by plotter printing ink containing silver nanoparticles, its frequency and impulse response] *Nanotechnologies: development, application – XXI century*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 3–8 (in Russ).

22. Tuev V.I, Malyutin N.D., Loschilov A.G., Artishchev S.A., Zdrok A.E., Allanurov A.M., Bombizov A.A., Karaulnykh S.P., Makarov I.M., Ubaychin A.V. [Application of the additive printer (plotter) technology in electronics to form films from organic and inorganic materials] *Proceedings of the TUSUR University*, 2015, no. 4, (38), pp. 52–63 (in Russ).

23. Kachaev A.A, Kachaev A.A., Chaynikova A.S., Voronov V.A., Mazalov P.B., Lebedeva Yu.E. [Prospects for the use of additive technologies for the production of ceramic materials] Additive technologies: present and future. *Materials of the VII International Conference*. Moscow, 2021, pp. 149–159 (in Russ).

24. Smirnov A, Podrabinnik P.A., Kuznetsova E.V., Khmyrov R.S., Babushkin N.N. [Development and analysis of ceramopolymer filament for 3d printing by fdm method] *Perspective Technologies and Materials. Materials of the International Scientific-Practical Conference*, 2021, pp. 228–232 (in Russ).

25. Drogalev S.V, Malyutin N.D. [Use of a C section with unbalanced electromagnetic coupling in group delay correctors] *Telecommunications and Radio Engineering*, 1995, pp. 88 (in Russ).

26. Sychev A.N, Struchkov S.M. [Parameter sets of the uniform coupled transmission lines with unbalanced electromagnetic coupling] *Proceedings of the TUSUR University*, 2014. no. 1 (31), pp. 39–50 (in Russ).

27. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. [Time response of multiconductor transmission lines], *Tomsk: Tomsk State University*, 2007. – 152 p. (in Russ).

28. Fusco V.F. Microwave circuits. Analysis and Computer-aided Design *Prentice-Hall International*, 1990, pp. 87–129.

Anton G. Loschilov

Candidate of Science in Engineering, Associate Professor, Head of Department of Design of Units and Components for Radioelectronic Systems (KUDR), Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID ID: 0000-0003-0669-5694
Phone: +7 (382-2) 51-43-02
Email: lag@main.tusur.ru

Thanh T. Trinh

Postgraduate student, Department KUDR, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-445-04-86
Email: thanhvodoi1995@gmail.co

Nickolay D. Malyutin

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department KUDR, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID ID: 0000-0003-0317-9096
Phone: +7-913-854-48-48
Email: ndm@main.tusur.ru

George A. Malyutin

Student, Design KUDR, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-953-911-86-10
Email: mr.mageorge@yandex.ru

УДК 621.396.41

А.К. Мовчан, Е.В. Рогожников, Э.М. Дмитриев, С.А. Новичков, Д.В. Лаконцев**Расчет ослабления сигнала сетей сотовой связи 5G для частот диапазона FR1**

Представлена модель распространения радиосигнала системы сотовой связи пятого поколения с учетом неравномерности рельефа местности. Целью исследования является оценка уровня мощности сигнала на приемной стороне системы сотовой связи четвертого и пятого поколений при распространении сигнала над неровной местностью на частотных диапазонах FR1 (2,6 ГГц), FR1 (4,9 ГГц). При оценке мощности радиосигнала на приемной стороне в модели в качестве неровной местности использованы значения карты высот г. Томска, полученной в ходе программы SRTM3. Представленная модель распространения радиосигнала является моделью ITM (Irregular Terrain Model) Лонгли–Райса. Для данной модели приведены основные выражения, определяющие результирующее ослабление сигнала, а также выражения, описывающие геометрию трассы распространения. В статье отражены основные факторы, определяющие распространение сантиметровых волн, характерных для системы сотовой связи пятого поколения, приведены результаты моделирования распространения сигнала сотовой связи пятого 5G и четвертого 4G поколений на примере различных сценариев расположения абонентского терминала и базовой станции в г. Томске. Моделирование производилось для двух частотных диапазонов FR1 (4,9 ГГц) сети 5G и FR1 (2,6 ГГц) сети 4G. В результате моделирования получены значения ослабления уровня мощности сигнала при распространении на заданных трассах, а также, с учетом параметров приемопередающего оборудования, рассчитаны значения мощности сигнала на приемной стороне. По полученным данным произведена сравнительная оценка дальности связи для систем 4G и 5G.

Ключевые слова: 5G, мобильная связь, распространение радиоволн, зона покрытия, карта высот местности.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-17-23

На сегодняшний день по всему миру происходит активное внедрение сетей сотовой связи пятого поколения 5G NR (fifth generation new radio) [1].

Основными отличительными особенностями сетей 5G от сетей четвертого поколения являются: более высокие скорости передачи данных до 20 Гбит/с при передаче от базовой станции (БС) к абонентскому терминалу (АТ) и 10 Гбит/с при передаче в обратную сторону, меньшая задержка обработки данных в сети до 0,5 мс, большая энергоэффективность, поддержка трафика для устройств интернета вещей IoT (internet of things), большая плотность подключения абонентов к сети до 1 млн/км² [2].

Вышеописанные преимущества сети 5G достигаются благодаря использованию дополнительных частотных диапазонов и широкой полосы частот.

В спецификации 5G предполагается использовать два частотных диапазона: низкочастотный диапазон FR1 от 450 МГц до 6 ГГц и высокочастотный диапазон FR2 от 24,25 до 52,6 ГГц [3].

В России для сетей 5G выделены следующие полосы радиочастот: в FR1 это n79 с частотами от 4,4 до 5 ГГц, в FR2 это полоса n258 с частотами от 24,25 до 27,5 ГГц. При этом ширина полосы частот, занимаемая одним каналом, может составлять в FR1 до 100 МГц, а в FR2 – до 400 МГц. Для повышения энергоэффективности в 5G применяется технология формирования направленного радиолуча Beam Forming (BF), позволяющая автоматически ориентировать максимум излучения передатчика в сторону абонентского терминала [4, 5].

В системах связи для расчетов, связанных с определением уровня мощности полезного сигнала, приходящего на приемник, и последующим расче-

том зоны уверенного приема (зоны покрытия), необходима информация о технических характеристиках средств связи [6, 7]. В табл. 1 представлены основные технические характеристики приемопередающей аппаратуры БС и АТ для сети 5G. Данные, указанные в табл. 1, справедливы для базовой станции широкого радиуса действия (Wide Area BS) и для диапазона частот FR1 [8].

Таблица 1
Характеристики приемопередающей аппаратуры базовой станции и абонентского терминала

Параметр	Базовая станция 5G (4G)	Абонентский терминал
Мощность передатчика, дБм	43	22
Чувствительность приемника, дБм	-100,4	-85,7
Коэффициент шума приемника, дБ	10	10
Коэффициент усиления антенны, дБ	15	6

Диапазоны используемых в 5G частот относятся к сантиметровым радиоволнам (от 3 до 30 ГГц). Сантиметровые радиоволны распространяются в пределах прямой видимости и, в отличие от более длинных радиоволн, они не дифрагируют вокруг холмов, не огибают земную поверхность, как поверхностные радиоволны, и не отражаются от ионосферы, поэтому наземные каналы связи, использующие сантиметровые радиоволны, ограничены визуальным горизонтом в зависимости от высоты подвеса антенн. В верхней части сантиметрового диапазона они поглощаются газами в атмосфере, ограничивая практическое расстояние связи примерно до километра. Также стоит отметить, что распространение радиоволн в современной городской среде является сложной неоднородной электродинамиче-

ской структурой, в которой рельеф подстилающей поверхности оказывает существенное влияние на формирование поля в точке приема.

Ослабление коротковолнового сигнала в городе также вызвано отражением и рассеянием энергии радиоволны на крупных строениях. При этом отражение происходит, если размеры препятствия много больше длины волны. Также возможно поглощение мощности радиоволны препятствием.

В случае если размеры препятствия порядка длины волны или меньше, происходит рассеяние поступающей на край препятствия радиоволны, при этом она разделяется на множество радиоволн, распространяющихся в разные стороны [9].

В данной работе приводятся результаты оценки затухания сигнала между БС сети 5G и АТ для трех возможных случаев на примере г. Томска. Оценка затухания сигнала производится в разработанном программном обеспечении (ПО). Разработанное ПО реализовано на языке программирования C++ и производит расчет потерь мощности сигнала при его распространении на основе данных о рельефе местности, основываясь на модели распространения радиоволн ITM (Irregular Terrain Model) Лонгли–Райса [10].

Модель Лонгли–Райса

При прогнозировании распространения радиоволн модель Лонгли–Райса учитывает неоднородности рельефа местности [11]. Также данная модель имеет относительно малую чувствительность к частоте сигнала, позволяющую вести расчет для достаточно широкополосного сигнала, каким является сигнал сети 5G, сводящийся к расчету для центральной частоты. В данном случае реализован режим прогнозирования распространения радиоволн «точка-точка», при котором мощность полезного сигнала на приемной стороне зависит от геометрии трассы распространения радиоволны в выбранной местности, рефракции атмосферы и заданных характеристик направленности антенны приемопередающего оборудования. В общем случае мощность полезного сигнала на приемной стороне можно представить в виде следующего выражения:

$$P_{\text{rx}} = P_{\text{tx}} - \eta_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - A_0 - \eta_{\text{rx}} + G_{\text{rx}}, \quad (1)$$

где P_{tx} – выходная мощность передатчика; η_{tx} , η_{rx} – потери в антенном фидере передатчика и приемника; G_{tx} , G_{rx} – коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника; A_0 – результирующее ослабление радиосигнала на трассе.

Результирующее ослабление A_0 радиосигнала при распространении согласно модели Лонгли–Райса определяется потерями в свободном пространстве, дифракцией, тропосферным рассеянием и статистическими параметрами изменчивости условий распространения:

$$A_0 = A_{\text{fs}} + A_{\text{ref}} + A_{\text{var}}, \quad (2)$$

где A_{fs} – ослабление свободного пространства; A_{ref} – ослабление дифракцией и рассеянием радиоволны; A_{var} – ослабление изменчивостью условий распространения.

Ослабление радиоволны при распространении в свободном пространстве вызвано сферической расходимостью фронта волны и определяется как длиной волны, так и расстоянием передачи

$$A_{\text{fs}} = 20 \lg \left(\frac{4\pi df}{c} \right), \quad (3)$$

где d – протяженность трассы распространения; f – частота радиоволны; c – скорость света.

Ослабление A_{ref} определяется совместным действием дифракции, рассеяния и поглощения радиоволны:

$$A_{\text{ref}} = A_{\text{diff}} + A_{\text{scatt}} + A_a, \quad (4)$$

где A_{diff} – ослабление дифракцией радиоволны; A_{scatt} – ослабление рассеянием радиоволны; A_a – ослабление поглощением атмосферы.

Дифракционные потери A_{diff} при распространении радиоволны вызваны наличием преграждающих препятствий на пути распространения. Для трасс, где расстояние между передающей и приёмной станциями меньше, чем расстояние до их собственного радиогоризонта, дифракционные потери могут возникать на выступах земной поверхности вследствие неравномерности рельефа местности на трассе. Для загоризонтных трасс, на которых расстояние между передающей и приёмной станциями больше, чем расстояние до их собственного радиогоризонта, дифракционные потери возникают преимущественно там, где радиоволна пересекает линию горизонта.

Потери, вызванные тропосферным рассеянием, A_{scatt} проявляются вследствие диэлектрической неоднородности тропосферы при условии, что размеры неоднородностей превышают длину волны передаваемого сигнала. Диэлектрическая неоднородность тропосферы возникает вследствие локального изменения давления, температуры и влажности, что приводит к локальному изменению коэффициента преломления атмосферы. Расчет потерь, вызванных дифракцией и рассеянием в модели Лонгли–Райса, производится на основе законов геометрической оптики.

Ослабление A_a , вызванное поглощением радиоволны атмосферными газами, происходит в результате потерь энергии радиоволны в кислороде и парах воды и определяется плотностью водяных паров и температурой вблизи поверхности трассы распространения. Ослабление атмосферным поглощением необходимо учитывать лишь в высокочастотном диапазоне FR2.

Ослабление A_{var} , учитывающее вероятностный характер изменчивости условий распространения на заданной трассе, определяется следующим образом:

$$A_{\text{var}} = -V_{\text{med}} - Y_T - Y_L - Y_S, \quad (5)$$

где V_{med} – среднегодовое медианное значение потерь; Y_T – потери, вызванные изменчивостью среднечасовых значений затухания; Y_L – потери, вызванные изменчивостью местоположения в пространстве; Y_S – потери, вызванные изменчивостью ситуаций при измерениях.

Статистический параметр среднегодового медианного значения потерь V_{med} определяет медианное значение потерь, которое зависит от климата в рассматриваемом регионе местности. Параметр изменчивости во времени Y_T учитывает изменения среднечасовых значений затухания, например, из-за медленных изменений атмосферной рефракции или интенсивности атмосферной турбулентности. Параметр изменчивости местоположения Y_L учитывает какие-либо вариации рельефа местности в долгосрочной статистике, которые происходят на трассе распространения. Параметр изменчивости ситуации Y_S учитывает эффекты изменения условий и результатов измерений мощности, возникающих в результате действия неизвестных переменных параметров системы и условий распространения радиоволн.

Вышеописанные статистические параметры потерь распространения в своей совокупности определяют необходимый запас надежности связи на данной трассе [12, 13].

Перед расчетом ослабления, вносимого радиотрассой, определяются геометрические параметры радиолинии. Геометрические параметры радиолинии определяются взаимным расположением передающей и приемной станций с учетом кривизны рельефа местности. К основным геометрическим параметрам радиолинии относятся: фактическое расстояние по гладкой земле d (без учета неравномерности рельефа) между передающей и приемной станцией, среднее значение высоты над уровнем моря на протяжении всей радиолинии h_s , величина, обратная эффективному радиусу Земли γ_e в местности радиотрассы, комплексный импеданс почвы z_g в местности заданной трассы, расстояние до радиогоризонта для передающей и приемной станции d_h , угловое расстояние θ , высоты антенн передающей и приемной станций h_a . На рис. 1 показано относительное расположение БС и АТ на трассе и указаны некоторые из перечисленных выше геометрических параметров.

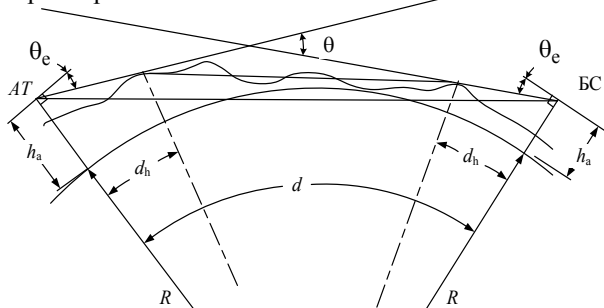


Рис. 1. Пример расположение БС и АТ на трассе

Расстояние d между БС и АТ по заданным их координатам может быть найдено следующим образом

$$d = 2R \arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{N2 - N1}{2} \right) + \cos(N1) \cos(N2) \sin^2 \left(\frac{E2 - E1}{2} \right)}, \quad (6)$$

где R – радиус Земли; $N1, N2$ – северная широта АТ и БС; $E1, E2$ – восточная долгота АТ и БС.

Величина, обратная эффективному радиусу Земли, определяется следующим образом:

$$\gamma_e = \frac{\left(1 - 0,04665 \cdot \exp \left(\frac{N_s}{179,3} \right) \right)}{R}, \quad (7)$$

где N_s – приведённый к h_s коэффициент рефракции.

$$N_s = N_0 \exp \left(-\frac{h_s}{9460} \right), \quad (8)$$

где N_0 – среднее значение рефракции у поверхности земли;

$$z_g = \sqrt{\varepsilon + j376,62 \frac{\sigma}{f}}, \quad (9)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость почвы; σ – электрическая проводимость почвы.

Расстояние до радиогоризонта в общем случае определяется следующим образом:

$$d_h = \sqrt{\frac{2h_a}{\gamma_e}}. \quad (10)$$

В случае если расстояние по гладкой земле между передающим и приемным пунктами меньше, чем их радиогоризонт, то такой случай соответствует связи в пределах прямой видимости. Для трасс прямой видимости в качестве радиогоризонта может быть принято расстояние до какого-либо препятствия на трассе распространения радиоволны.

Угловое расстояние между передающей и приемной станциями определяется следующим образом:

$$\theta = d_L \gamma_e + \theta_{et} + \theta_{er}, \quad (11)$$

где θ_{er}, θ_{et} – углы возвышения радиогоризонта для передатчика и приемника.

Угол возвышения радиогоризонта определяется следующим образом:

$$\theta_e = \frac{h_L - h_a}{d_h} - 2d_L \gamma_e, \quad (12)$$

где h_L – высота препятствия над средним уровнем моря в точке касания с линией прямой видимости.

В пределах прямой видимости на ровном участке местности угловые величины могут иметь значения, близкие к нулю и могут не учитываться [14].

Моделирование

В рамках данной работы приводятся результаты оценки затухания сигнала между АТ и БС сетей 4G и 5G для сценариев расположения станций на примере г. Томска с использованием разработанной авторами программной реализации вышеописанной модели Лонгли–Райса. Входными параметрами модели являются: координаты БС и АТ в формате десятичных градусов северной широты N и восточной долготы E , высоты рельефа местности над уровнем моря на трассе, соединяющей передающую и приемную станции и извлекаемые из загружаемой карты высот Томской области, коэффициент атмосферной рефракции N_0 для заданного региона, относительная диэлектрическая проницаемость почвы ε на задан-

ной трассе, электрическая проводимость почвы σ на заданной трассе, центральная частота используемого диапазона частот f , выходные мощности АТ и БС ($P_{\text{тх}}$, $P_{\text{рх}}$), потери мощности в фидерах $\eta_{\text{тх}}$, $\eta_{\text{рх}}$ АТ и БС, коэффициенты усиления антенн передающей и приемной станций $G_{\text{тх}}$, $G_{\text{рх}}$. Оценка затухания в модели будет производиться для диапазонов FR1 (4,9 ГГц) сети 5G и FR1 (2,6 ГГц) сети 4G. В табл. 2 представлены входные параметры модели, характеризующие приемопередающее оборудование. С учетом того, что мощность передатчика АТ значительно меньше мощности передатчика БС, то разумно производить моделирование распространения радиосигнала и далее оценку зоны покрытия для случая, когда источником сигнала является передатчик АТ.

Таблица 2

Входные параметры модели базовой станции и абонентского терминала

Параметр	Базовая станция	Абонентский терминал
Мощность передатчика, дБм	43	22
Коэффициент усиления антенны, дБ	15	6
Высота подвеса антенны, м	20	1,8
Потери мощности в фидере, дБ	1	1

В табл. 3 представлены входные параметры модели, характеризующие трассу распространения сигнала.

Таблица 3

Входные параметры модели радиотрассы

Параметр	Значение
Коэффициент рефракции N_0	301
Проводимость почвы σ , См	0,05
Относительная диэлектрическая проницаемость почвы ϵ	15
Климат региона	Умеренный

В качестве данных высот местности Томского региона были использованы карты программы SRTM3 (SRTM-Shuttle Radar Topography Mission).

Карты высот SRTM3 представляют собой данные высот земной поверхности относительно эллипсоида WGS84. Каждый отдельный файл карты покрывает территорию $1 \times 1^\circ$ градусов с разрешением 3 с на отсчет.

В ходе моделирования было рассмотрено двадцать сценариев расположения АТ относительно БС в г. Томске для сетей 4G и 5G. Координаты расположения БС при моделировании для систем 4G и 5G были неизменны, а высота антенны над уровнем моря составляла 220 м. На рис. 2 представлен профиль рельефа местности одного сценария моделирования с расположенными на ней БС и АТ сетей 4G и 5G.

В табл. 4 представлены результаты расчета параметров высоты над уровнем моря с учетом высоты антенны для АТ, а также расстояний для БС и АТ согласно их координатам.

В табл. 5 представлены результаты моделирования для расположения БС и АТ в соответствии с табл. 4, для которых были получены значения затухания A_0 для радиосигнала АТ и значения входной мощности приёмника БС.

хания A_0 для радиосигнала АТ и значения входной мощности приёмника БС.

Таблица 4

Параметры высот и расстояний БС и АТ

№	Расстояние между БС и АТ, км для 5G (4G)	Высота, м АТ для 5G (4G)
1	23,8(26,14)	179,5(178,2)
2	25(27,37)	134(133,7)
3	26(27,74)	178,6(179,8)

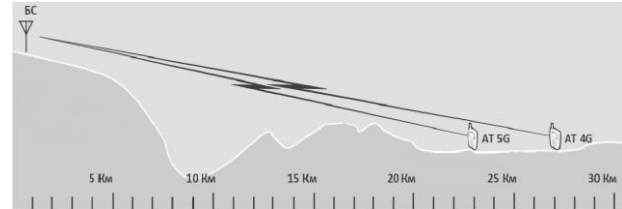


Рис. 2. Расположение БС и АТ на одном сценарии моделирования

Таблица 5

Результаты моделирования

№	Затухание сигнала A_0 , дБ для 5G (4G)	Мощность на приемнике БС, дБм 5G (4G)
1	139 (138,4)	-99,1 (-98,5)
2	138,4 (138,3)	-98,8 (-98,7)
3	139,1 (138,2)	-99,9 (-99)

Полученные в ходе моделирования значения ослабления на трассе и уровни мощности сигнала на приемниках 5G и 4G использовались для определения средней разницы в расстояниях между БС и АТ соответствующих сетей при условии приближенного равенства сигнала на приемной стороне значению чувствительности приемников БС в 5G (-100,4 дБм) (см. табл. 1) и 4G (-101,5) [15].

Для сравнительной оценки дальности действия сетей 4G и 5G был выполнен анализ результатов двадцати итераций моделирования. В среднем дальность связи от АТ к БС в сети 5G составила 27,47 км, а для сети 4G – 30 км, что составляет разницу в 2,53 км по дальности связи сетей 5G и 4G.

Из полученных результатов следует, что дальность связи в сети 4G в среднем больше на 9,3%, чем в сети 5G, в условиях неровной местности без учета городской застройки, а также при условии работоспособности данных сетей и их минимальной пропускной способности [16].

Заключение

В данной работе представлены результаты расчета затухания радиосигнала и сравнительной оценки дальности действия для сетей 4G и 5G частот диапазонов FR1 (2,6 ГГц) и FR1 (4,9 ГГц) с учетом характеристик приемопередающего оборудования и особенностей рельефа местности в окрестностях г. Томска.

Моделирование производилось с использованием программной реализации модели распространения радиоволн Лонгли–Райса.

При моделировании были рассмотрены двадцать различных сценариев относительного распо-

ложения базовой станции и абонентского терминала, отличающиеся между собой расстояниями между терминалами и их высотой. Результаты, полученные в ходе моделирования с использованием разработанного программного обеспечения, позволили оценить дальность связи в сетях 4G и 5G. Были получены значения расстояний между терминалами, а также значения их полных высот относительно уровня моря. Также были получены значения ослабления сигнала АТ на пути к БС и значения мощности сигнала на входе приемника БС. Были получены средние значения дальностей связи в сетях 4G и 5G, что позволило сделать выводы о разнице в дальности связи в данных сетях.

Моделирование было произведено также с учетом того, что источником сигнала был передатчик АТ, имеющий меньшую выходную мощность по сравнению с передатчиком БС, что, в свою очередь, позволило более надежно оценить дальность связи в данной сети.

Полученные в данной работе значения ослаблений радиосигнала учитывали лишь особенности рельефа местности на каждой из трасс. В дальнейшем предполагается разработка программного обеспечения, позволяющего производить расчет ослабления радиосигнала с учетом более точного описания городской радиотрассы, включающей в себя различные строения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минцифры России и АО «РВК», а также Сколковского института науки и технологий, идентификатор соглашения предоставления субсидии 0000000007119P190002, № 005/20 от 26.03.2020 г.

Литература

1. Iwamura M. NGMN view on 5G architecture // IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring). – 2015. – P. 1–5.
2. A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks / L. Zhang, H. Zhao, S. Hou, Z. Zhao, H. Xu, X. Wu, Q. Wu, R. Zhang // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 117460–117504.
3. Radio propagation and wireless coverage of LSAA-based 5G millimeter-wave mobile communication systems / H. Wang, P. Zhang, J. Li, X. You // China Communications. – 2019. – Vol. 16, No. 5. – P. 1–18.
4. Design and implementation of an active multibeam antenna system with 64 RF channels and 256 antenna elements for massive MIMO application in 5G wireless communications / P. Xingdong, H. Wei, Y. Tianyang, L. Linsheng // China communications. – 2014. – Vol. 11, No. 11. – P. 16–23.
5. Low Profile, Compact Size Frequency Reconfigurable Antenna for 5G mm-Wave Wireless Communication / I. Ahmad, H. Dildar, W.U.R. Khan, S.A.A. Shah, S. Ullah, S. Ullah, S.M. Umar, M.A. Albreem, M.H. Alsharif, K. Vasudevan // IEEE 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). – 2020. – P. 712–716.
6. Long distance and high bandwidth wireless link tests for a 39 GHz to 28 GHz 5G low-cost repeater / S. Maier, H. Schlesinger, W. Templ, H. Viswanathan // IEEE 5G World Forum (5GWF). – 2018. – P. 338–342.
7. Study of realistic antenna patterns in 5G mmWave cellular scenarios / M. Rebato, L. Resteghini, C. Mazzucco,

M. Zorzi // IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2018. – P. 1–6.

8. 5G NR Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 15.7.0 Release 15) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/15.07.00_60/ts_138104v150700p.pdf, свободный (дата обращения: 13.09.2021).

9. Мелихов С.В. Модели предсказания уровня сигнала для расчета зон обслуживания базовых станций систем мобильной связи. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2014. – 18 с.

10. Saha R.K. Comparative Analysis of Path Loss Models in Mobile Communications for Urban Case // Asian Institute of Technology, Thailand. – 2016. – P. 1–30.

11. Hufford G.A. A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode / G.A. Hufford, A.G. Longley, W.A. Kissick. – Washington, DC, USA: U.S. Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, 1982. – 126 p.

12. Seybold J.S. Introduction to RF propagation. – John Wiley & Sons. – 2005. – 317 p.

13. Reformat A.N. Review of methods for calculating the coverage areas of base stations of mobile radio communication networks / A.N. Reformat, V.G. Sosunov, O.V. Plygunov // Symbol of Science. – 2015. – P. 44–52.

14. Wong H. Field Strength Prediction in Irregular Terrain-the PTP Model // Report of Federal Communication Commission, USA. – 2002. – P. 1–8.

15. 5G New Radio conducted Base Station receiver tests according to TS 38.141-1 Rel. 15 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/gfm314/GFM314_3e_5G_NR_BaseStation_Rx_Tests.pdf, свободный (дата обращения: 01.03.2022).

16. Mapping between Average SINR and Supported Throughput in 5G New Radio Small Cell Networks / A.R. Ramos, B.C. Silva, M.S. Lourenço, E.B. Teixeira, F.J. Velez // 22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). – 2019. – P. 1–6.

Мовчан Андрей Кириллович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-34-30
Эл. почта: ltaak@tu.tusur.ru

Рогожников Евгений Васильевич

Канд. техн. наук., зав. каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-98
Эл. почта: udzhon@mail.ru

Дмитриев Эдгар Михайлович

Аспирант каф. ТОР ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-98
Эл. почта: edgar.dmitriev@tusur.ru

Новичков Серафим Алексеевич

Гл. конструктор лидирующего исследовательского центра «Сеть радиодоступа 5G с открытой архитектурой», Сколковский институт науки и технологий (Сколтех) Большой бульвар, д. 30, стр. 1., г. Москва, Россия, 121205 Тел.: +7 (495-2) 80-14-81 Эл. почта: s.novichkov@skoltech.ru

Лаконцев Дмитрий Владимирович

Канд. техн. наук., доцент, рук. центра компетенций национальной технической инициативы «Технологии беспроводной связи и интернета вещей», Сколковский институт науки и технологий (Сколтех) Большой бульвар, д. 30, стр. 1., г. Москва, Россия, 121205 Эл. почта: d.lakontsev@skoltech.ru

Movchan A.K., Rogozhnikov E.V., Dmitriev E.M., Novichkov S.A., Lakontsev D.V.

Calculation of signal attenuation of 5G cellular networks for frequencies of the FR1 band

The paper presents a model for the propagation of a radio signal of a fifth-generation cellular communication system, taking into account the unevenness of the terrain. The aim of the study is to assess the signal power level on the receiving side of the fourth and fifth generation cellular communication system when the signal propagates over uneven terrain in the frequency bands FR1 (2.6 GHz), FR1 (4.9 GHz). When estimating the power of the radio signal on the receiving side in the model, the values of the height map of the of Tomsk city, obtained in the course of the SRTM3 program, were used as uneven terrain. The presented radio signal propagation model is the Longley–Rice ITM (Irregular Terrain Model). For this model, the main expressions are given that determine the resulting signal attenuation, as well as expressions that describe the geometry of the propagation path. The article reflects the main factors that determine the propagation of centimeter waves characteristic of the fifth generation cellular communication system, presents the results of modeling the propagation of the fifth 5G and fourth 4G generation cellular signal using the example of various scenarios for the location of a subscriber terminal and a base station in the Tomsk city. The simulation was carried out for two frequency bands FR1 (4.9 GHz) of the 5G network and FR1 (2.6 GHz) of the 4G network. As a result of the simulation, the values of the attenuation of the signal power level during propagation along the given paths were obtained, and also, taking into account the parameters of the transceiver equipment, the values of the signal power on the receiving side were calculated. Based on the data obtained, a comparative assessment of the communication range for 4G and 5G systems was made.

Keywords: 5G, mobile communications, radio propagation, coverage area, millimeter waves, terrain elevation map.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-17-23

References

1. Iwamura M. NGMN view on 5G architecture. *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2015, pp. 1–5.
2. Zhang L., Zhao H., Hou S., Zhao Z., Xu H., Wu X., Wu Q., Zhang R. A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 117460–117504.
3. Wang H., Zhang P., Li J., You X. Radio propagation and wireless coverage of LSAA-based 5G millimeter-wave

mobile communication systems. *China Communications*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 1–18.

4. Xingdong P., Wei H., Tianyang Y., Linsheng L. Design and implementation of an active multibeam antenna system with 64 RF channels and 256 antenna elements for massive MIMO application in 5G wireless communications. *China Communications*, 2014, vol. 11, no. 11, pp. 16–23.

5. Ahmad I., Dildar H., Khan W.U.R., Shah S.A.A., Ullah S., Ullah S., Umar S.M., Albreem M.A., Alsharif M.H., Vasudevan K. Low Profile, Compact Size Frequency Reconfigurable Antenna for 5G mm-Wave Wireless Communication. *IEEE 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, 2020, pp. 712–716.

6. Maier S., Schlesinger H., Templ W., Viswanathan H. Long distance and high bandwidth wireless link tests for a 39 GHz to 28 GHz 5G low-cost repeater. *IEEE 5G World Forum (5GWF)*, 2018, pp. 338–342.

7. Rebato M., Resteghini L., Mazzucco C., Zorzi M. Study of realistic antenna patterns in 5G mmWave cellular scenarios. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2018, pp. 1–6.

8. 5G NR Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 15.7.0 Release 15). Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/15.07.00_60/ts_138104v150700p.pdf, free. (Accessed: September 13, 2021).

9. Melikhov S.V. [Signal level prediction models for calculating the service areas of base stations of mobile communication systems]. Tomsk, TUSUR Publ., 2014, 18 p. (in Russ.).

10. Saha R.K. Comparative Analysis of Path Loss Models in Mobile Communications for Urban Case. *Asian Institute of Technology, Thailand*, 2016, pp. 1–30.

11. Hufford G.A., Longley A.G., Kissick W.A. A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode. *Washington, DC, USA: US Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration*, 1982, 126 p.

12. Seybold J. S. Introduction to RF propagation. *John Wiley & Sons*, 2005, 317 p.

13. Reformat A.N., Sosunov V. G., Plygunov O. V. Review of methods for calculating the coverage areas of base stations of mobile radio communication networks. *Symbol of Science*, 2015, pp. 44–52.

14. Wong H. Field Strength Prediction in Irregular Terrain-the PTP Model. *Report of Federal Communication Commission, USA*, 2002, pp. 1–8.

15. 5G New Radio conducted Base Station receiver tests according to TS 38.141-1 Rel. 15. Available at: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/gfm314/GFM314_3e_5G_NR_BaseStation_Rx_Tests.pdf, free (Accessed: March 03, 2022).

16. Ramos A.R., Silva B.C., Lourenço M.S., Teixeira E.B., Velez F.J. Mapping between Average SINR and Supported Throughput in 5G New Radio Small Cell Networks. *22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2019, pp. 1–6.

Andrey K. Movchan

Junior Researcher (Department of Television and Control), Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050 Phone: +7 (382-2) 41-34-30 Email: mr.movchann@mail.ru

Eugeny V. Rogozhnikov

Candidate of Science in Engineering, Head of the Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-98
Email: udzhon@mail.ru

Edgar M. Dmitriev

Postgraduate Student, Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-98
Email: dmitriyev.edgar@gmail.com

Serafim A. Novichkov

Chief Design Engineer of Leading Research Center «5G Open Radio Access Networks», Skoltech
30, Bolshoy Boulevard, bld. 1, Moscow, Russia, 121205
Phone: +7 (495-2) 80-14-81
Email: S.Novichkov@skoltech.ru

Dmitriy V. Lakontsev

Candidate of Science in Engineering, Associate Professor, Head of the Center of Excellence NTI «The Wireless Network Technologies and Internet of Things», Skoltech
30, Bolshoy Boulevard, bld. 1, Moscow, Russia, 121205

УДК 621.391

Е.С. Жечев, И.А. Иванов, А.С. Козинец

Анализ и систематизация способов трассировки печатных проводников на основе симметричных структур с модальной фильтрацией

Для повышения функциональной безопасности радиоэлектронной аппаратуры прибегают к резервированию ее блоков, узлов и межсоединений. В отличие от широко используемого холодного резервирования технология модального резервирования позволяет обеспечить защиту узлов и межсоединений от сверхширокополосных помех. Существует ряд подходов и методов обеспечения многократного модального резервирования, обладающих различными конструктивными особенностями, электрическими и массогабаритными характеристиками, а также областью применения. Примечательны структуры с симметрией проводников по двум плоскостям, позволяющие реализовать трехкратное модальное резервирование с одинаковой эффективностью подавления сверхширокополосных помех для любой цепи. Цель работы – представить анализ и систематизацию способов многократного модального резервирования на основе симметричных структур. Для решения поставленной задачи проведена оценка технологичности восьми способов модального резервирования, их эффективности подавления сверхширокополосных помех и области применения. С помощью N -норм выполнена оценка критичности разложенных импульсов для каждой структуры до и после отказа. Выявлено, что все исследуемые структуры с модальным резервированием позволяют значительно ослабить импульс сверхширокополосной помехи.

Ключевые слова: модальное резервирование, электромагнитная совместимость, сверхширокополосные помехи, функциональная безопасность, зеркально-симметричная структура, межсоединения, линия передачи.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-24-36

Для повышения функциональной безопасности необслуживаемой или частично обслуживаемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) разработчики применяют резервирование ее наиболее уязвимых блоков, узлов и межсоединений [1, 2]. Понятие функциональной безопасности определяет ситуацию, в которой «безопасность» зависит от правильного функционирования оборудования или системы. Точность и надежность электронного оборудования, связанного с безопасностью, – проблема функциональной безопасности [3]. Из-за того, что надежность является убывающей функцией времени, вероятность возникновения отказов постепенно возрастает. С точки зрения использования резерва разделяют три класса: горячее, теплое и холодное резервирование. Последний класс реализуется чаще всего из-за простоты исполнения. Полное дублирование блоков или узлов РЭА обеспечивает бесперебойную работоспособность в условиях частичного или полного отказов, однако данный подход обладает низкой помехозащищенностью. Так, кондуктивные помехи, возникающие при работе силовых и коммутационных устройств, могут приводить к нарушению функционирования критичной РЭА. Для обезвреживания современных летательных аппаратов, навигационных систем и сложного промышленного оборудования могут применяться мощные генераторы, формирующие схожие помехи [4, 5]. Поэтому особенно важно учитывать требования электромагнитной совместимости на ранних этапах разработки [6]. Важно применять эффективные методы и меры снижения рисков, связанных с электромагнитными помехами в критичных системах [7, 8]. Сверхширокополосные помехи (СШП) являются наиболее опасным видом кондуктивных помех [9].

При этом традиционные схмотехнические средства защиты от помех, применяемые в цепях с резервированием и без него, не справляются с такого рода помехами. Наиболее эффективным инструментом в борьбе с СШП-помехами является технология модальной фильтрации и устройства на ее основе – модальные фильтры и меандровые линии задержки [10, 11].

В данной работе рассмотрен способ повышения функциональной безопасности РЭА, объединяющий в себе защиту от кондуктивных помех малой длительности и классическое резервирование (рис. 1). Такой способ называется модальным резервированием (МР) и является долгосрочным решением холодного резервирования [12].

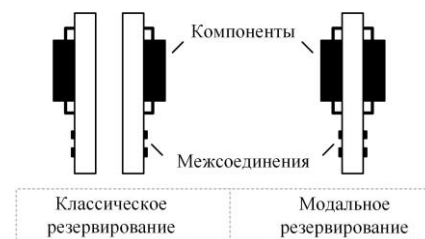


Рис. 1. Два способа холодного резервирования цепей и межсоединений

Основная идея МР заключается в монтаже на печатную плату (ПП) резервируемых и резервирующих проводников с сильной электромагнитной связью между ними. Надежность таких структур будет определяться, как и в структурах с классическим резервированием, через кратность резерва, вероятности безотказной работы и вероятности отказов каждой из подключенных цепей. Между тем

МР делает возможным использование модальных искажений для подавления кондуктивных СШП-помех. В результате уменьшаются риски, связанные с функциональными сбоями, вызванными такого рода помехами.

Последний обзор по данному направлению опубликован в 2019 г. [13], однако, за прошедшее время теория МР сильно развилась. Последние теоретические и экспериментальные исследования по многократному МР посвящены зеркально-симметричным структурам. Тем не менее по данному направлению ранее не представлялись работы, анализирующие все известные способы МР межсоединений ПП на основе симметричных структур. Между тем такое исследование представляется актуальным, так как оно позволит определить их возможную область применения. Таким образом, цель данной работы – выполнить анализ и систематизацию способов многократного МР межсоединений ПП на основе симметричных структур. Научная значимость заключается в том, что в работе приведена сравнительная оценка технологичности, области применения и эффективности использования симметричных структур с многократным МР.

Обзор способов МР

Первый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием, включающий в себя защиту от СШП-помех и холодное резервирование, опубликован в 2015 г. [14]. Техническим результатом такого способа является уменьшение восприимчивости резервируемой цепи к внешним кондуктивным помехам. В случае выхода из строя резервируемой цепи в резервной цепи будет достигаться схожий технический результат. Данный способ трассировки обладает малым коэффициентом ослабления, но в то же время является самым простым с точки зрения реализации в реальных структурах, так как при этом используется стандартная двухсторонняя ПП (ДПП). Существуют модификации указанного способа МР с дополнительным диэлектриком между резервируемой и резервной цепями [15].

Такой подход обеспечивает большую разность погонных задержек мод, что в конечном итоге увеличивает коэффициент ослабления. Этот способ применим лишь в некоторых вариантах компоновки, так как дополнительный слой диэлектрика усложняет технологию производства. Существует способ размещения компонентов на противоположных сторонах резервируемой и резервных ПП [16]. При этом обеспечивается лицевая связь между резервируемой и резервной цепями. В результате этого увеличивается разность задержек мод. Реализация такой структуры не ограничивается элементной базой, однако представляется технологически усложненной из-за необходимости изготовления многослойных ПП (МПП). Известен способ компоновки резервных и резервируемых элементов внутри ПП [17]. При этом внешние слои такой структуры являются опорными проводниками, за счет чего достигается экранирование внутренних межсоединений и компонен-

тов. Существенным недостатком такого способа являются использование только бескорпусной элементной базы и значительное усложнение ПП.

Для плоского кабеля существует реализация, обеспечивающая лицевую связь между резервируемой и резервной цепями [18]. Изготовление кабелей подобным образом не требует сложных технических решений. При этом большая длина линии может дополнительно вносить значительное ослабление СШП-помех. Реализация данного способа на практике, вероятно, потребует специализированных переходов и соединителей, что создаст определённые неудобства.

Для реализации трехкратного МР в межсоединениях с однократным МР дополнительно можно ввести две резервные цепи, а в проводящих слоях встроить опорные проводники [19]. За счёт лицевой связи между проводниками достигается высокий коэффициент ослабления. Так же, как и с плоскими кабелями, это решение предлагает нестандартную конфигурацию ПП, что затрудняет его практическую реализацию. Трехкратное МР достигается также и в цепях на МПП [20]. К двум проводникам резервируемой и резервной цепей, расположенным на разных слоях ПП, симметрично вводятся две дополнительные резервные цепи. При этом компоненты монтируются на внешних слоях. Лицевая связь обеспечивает высокий коэффициент ослабления и большую разность погонных задержек. Данный способ, как и многие другие, требует для реализации технологию изготовления МПП, что усложняет производство.

В [21] представлен способ компоновки печатных проводников для цепей с МР на основе зеркально-симметричной структуры. Основная идея заключается в том, что опорный проводник выполняется в виде двух отдельных проводников внутри диэлектрической подложки, расположенных параллельно друг другу и закороченных на ближнем и дальнем концах. При этом резервируемая и резервная цепи выполняются на внешних сторонах ПП. Из-за особенностей расположения проводников при неоптимальных геометрических параметрах структуры разложить СШП-помеху удастся только при большой длине, что значительно ограничивает возможную область применения. Асимметричные структуры на основе микрополосковых линий передачи (ЛП) и меандровых линий задержки с различной конфигурацией проводников, в том числе скрытых в диэлектрическом слое, предлагаются в [22]. Переход от симметрии к асимметрии позволяет использовать дополнительные импульсы для увеличения коэффициента ослабления.

Анализ структур с многократным МР

Для проведения сравнительного анализа симметричных структур с многократным МР составлен ряд критериев:

1. Технологичность:

- количество слоев ПП;
- количество рабочих поверхностей, используемых для монтажа компонентов;

- наличие глухих/скрытых переходных металлизированных отверстий.
2. Массогабаритные показатели:
- плотность трассировки цепей с МР;
 - минимальная длина, при которой возможно разложение СШП-помехи;
 - поперечное сечение структуры;
3. Применимость:
- размещение компонентов РЭА;
 - полоса пропускания (по уровню 0,707).
4. Эффективность подавления СШП-помех:
- значение максимальной амплитуды разложенных импульсов на выходе структуры;
 - разность погонных задержек мод.

Каждому критерию дана численная оценка, после чего они были нормированы по максимальному значению, так, чтобы их значение не превышало 1. Выражение (1) описывает используемый механизм численной оценки критериев:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \frac{C_{i,j}}{C_{i,j_{\max}}} m k_j, \quad (1)$$

где C_i – итоговое значение суммы критериев в группе; $C_{i,j}$ – значение критерия; $C_{i,j_{\max}}$ – максимальное значение критерия среди всех структур; $m k_j$ – значение весового коэффициента; $i = 1, 2, \dots, N$; N – число структур; $j = 1, 2, \dots, n$; n – число критериев в группе. Чем выше значение критерия, тем показатель структуры лучше.

Для анализа симметричных структур с многократным МР необходимо выполнить квазистатическое моделирование во временной и частотной областях. Такой подход позволяет оценить эффективность подавления СШП-помех, полосы пропускания и задерживания. В качестве СШП-помехи использован трапецеидальный импульс со следующими параметрами: ЭДС 2 В, длительности фронта, спада и плоской вершины по 50 пс. Анализ частотной зависимости $|S_{21}|$ выполнен в диапазоне от 0 до 5 ГГц, позволяющем оценить общее вносимое ослабление.

Следует отметить, что изначально не все рассматриваемые структуры согласованы с трактом 50 Ом. Для корректного сравнения между собой получены оптимальные параметры структур, согласованные с измерительным трактом. Во всех схемах присутствуют оконечные нагрузки $R = 50$ Ом. Также для каждой структуры рассмотрен сценарий резервирования, когда резервируемый проводник «отрывается» на ближнем и дальнем концах (отказ одной из цепей). Такой вариант отказа может быть вызван механическим повреждением или выгоранием компонентов, оканчивающих резервируемую цепь. При моделировании сопоставления оконечных нагрузок на этом проводнике приняты равными 10 ГОм. При этом происходило переключение источника СШП-помехи на вход соседней цепи (проводник 2). Формы напряжения разложенных импульсов после отказа анализировались на выходе этого же проводника.

Импульс СШП-помехи опасен для РЭА по многим причинам. Так, его большая амплитуда может

привести к электрическому пробое, быстрое время нарастания – к образованию искры, среднее действующее значение напряжения – к выгоранию компонентов и т.д. Для комплексной оценки опасности входного воздействия и разложенных импульсов, а также для сравнения эффективности подавления исследуемых структур с МР использованы N -нормы [23]. В табл. 1 представлены используемые N -нормы и их описание из [24, 25].

Таблица 1

Используемые N -нормы и их описание			
№	Наименование	Выражение	Применение
N_1	Пиковое (абсолютное) значение	$ U(t) _{\max}$	Сбой схемы / электрический пробой / дуговые эффекты
N_2	Пиковая (абсолютная) производная	$\left \frac{dU(t)}{dt} \right _{\max}$	Искрение компонента / сбой схемы
N_3	Пиковый (абсолютный) импульс	$\left \int_0^t U(t) dt \right _{\max}$	Диэлектрический пробой (если $U(t)$ обозначает поле E)
N_4	Выпрямленный общий импульс	$\int_0^{\infty} U(t) dt$	Повреждение оборудования
N_5	Квадратный корень действующего напряжения	$\left\{ \int_0^{\infty} U(t) ^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$	Выгорание компонента

* $U(t)$ – форма напряжения СШП-помехи или разложенных импульсов.

Трехкратное МР на МПП (структура № 1)

Структура представляет собой 5-проводную ЛП на МПП с симметрией по двум плоскостям, где проводник 1 является резервируемым, проводники 2, 3 и 4 – резервными, а проводники 5 и 6 – опорными. Данная структура является модификацией четырехпроводной зеркально-симметричной структуры [26]. Проведен ряд вычислительных и лабораторных исследований [27–29]. Эквивалентная схема включения и поперечное сечение представлены на рис. 2.

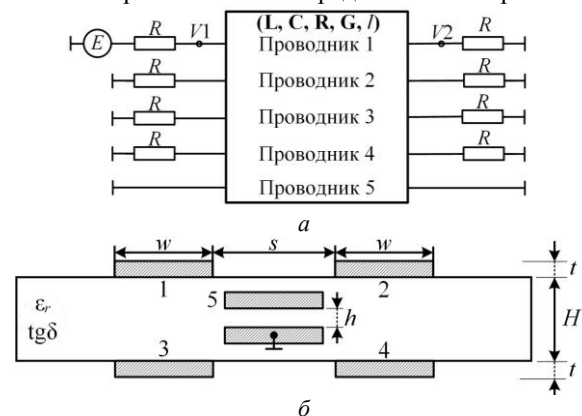


Рис. 2. Эквивалентная схема включения (а) и поперечное сечение (б) структуры с трехкратным МР на МПП

Параметры структуры: расстояние между внешними проводниками $s = 700$ мкм, ширина проводников $w = 1000$ мкм, толщина проводников $t = 35$ мкм, расстояние между внутренними провод-

никами $h = 510$ мкм, толщина подложки $H = 1000$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 4,3$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,025$, длина линии $l = 1$ м (электрические параметры диэлектрика приведены для частоты 1 МГц). В качестве проводящего материала использовалась медь с проводимостью 59,6 МСм/м (далее в проводниках во всех структурах использовался этот материал).

На рис. 3 представлены результаты анализа временных и частотных характеристик до и после отказа. Видно, что импульс СШП-помехи разделился на 4 равных импульса меньшей амплитуды. При этом интервалы между ними также выровнены. Максимальное напряжение на выходе составило: до отказа – 0,081 В, после отказа – 0,087 В. Частота среза, определяемая по уровню минус 3 дБ, в обоих случаях составила 180 МГц. В широком частотном диапазоне от 600 МГц до 5 ГГц ослабление составляет не менее 17 дБ.

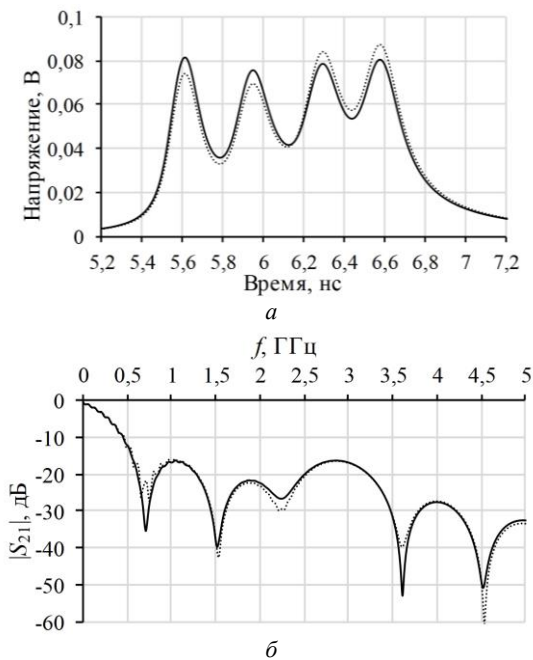


Рис. 3. Формы разложенных импульсов (а) и частотная зависимость $|S_{21}|$ (б) структуры с трехкратным МР на МПП до (—) и после (⋯) отказа

Структура с 3-кратным МР, реализованная на 4-слойной ПП, имеет среднюю технологичность. Это обусловлено тем, что для ее реализации необходима технология изготовления МПП. В то же время конструкция полностью удовлетворяет стандартному технологическому процессу изготовления МПП, требующему четное количество слоев. Высокий уровень применимости обусловлен наибольшей полосой частот для полезных сигналов. Равная амплитуда импульсов разложения и равные интервалы между ними дают данной структуре высокую оценку эффективности подавлении СШП-помех. Относительно небольшая длина, достаточная для разложения помехи, и относительно низкая плотность

трассировки дают данному способу МР средние массогабаритные характеристики.

Трехкратное МР на МПП с экранированием (структура № 2)

Данная структура является 5-проводной ЛП с симметрией по двум плоскостям, которая выполнена на внутренних слоях четырехслойной ПП, опорные проводники, в свою очередь, расположены на ее внешних слоях и представляют собой сплошной полигон. Данная структура также является запатентованной [30] и хорошо исследованной [31, 32]. Эквивалентная схема включения представлена на рис. 2, а, а поперечное сечение – на рис. 4.

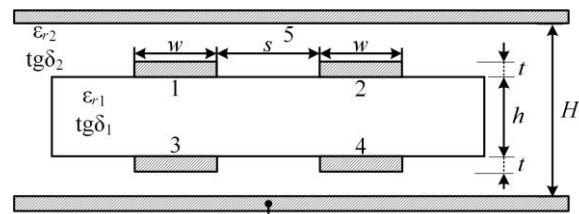


Рис. 4. Поперечное сечение структуры с трехкратным МР на МПП с экранированием

Параметры структуры: $s = 150$ мкм, $w = 1670$ мкм, $t = 35$ мкм, $h = 612$ мкм, $H = 3000$ мкм, $\epsilon_{r1} = 4,3$, $\epsilon_{r2} = 10,2$, $\text{tg}\delta_1 = 0,0037$, $\text{tg}\delta_2 = 0,025$, $l = 1$ м. На рис. 5 представлены результаты анализа временных и частотных характеристик.

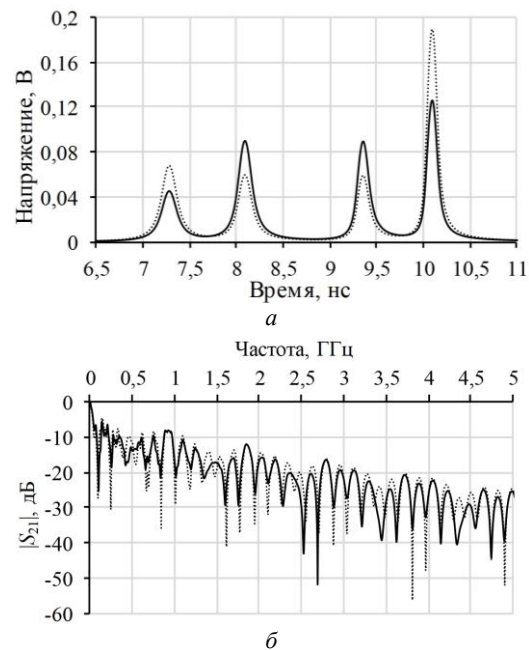


Рис. 5. Формы разложенных импульсов (а) и частотная зависимость $|S_{21}|$ (б) структуры с трехкратным МР на МПП с экранированием до (—) и после (⋯) отказа

Видно, что, как и в структуре № 1, импульс СШП помехи разделился на 4 импульса меньшей амплитуды. При этом интервалы между ними, а также их амплитуды не выровнены. Максимальное напряжение на выходе составило: до отказа – 0,13 В,

после отказа – 0,19 В. Частота среза составила 24 МГц. В широком частотном диапазоне от 800 МГц до 5 ГГц характеристика убывает вплоть до минус 26 дБ.

Структура с 3-кратным МР, реализованная на 4-слойной ПП, обладает такой же технологичностью, как и структура № 1. Это обусловлено тем, что для ее реализации также необходима технология изготовления МПП. Средний уровень применимости обусловлен небольшой полосой частот для полезных сигналов. Сильная связь с опорным проводником обеспечивает высокую разность погонных задержек мод, а в совокупности с экранированием они дают данной структуре очень высокие показатели эффективности подавления СШП-помех. Массогабаритные характеристики средние из-за относительно небольшой длины, достаточной для разложения импульса СШП-помехи.

Трехкратное МР на ДПП (структура № 3)

Структура представляет собой 7-проводную ЛП на ДПП с симметрией по двум плоскостям, где проводник 1 является резервируемым, проводники 2–4 – резервными, а проводники 5–7 – опорными. Данная структура также является запатентованной [33] и хорошо исследованной [19, 34]. Эквивалентная схема включения и поперечное сечение представлены на рис. 6.

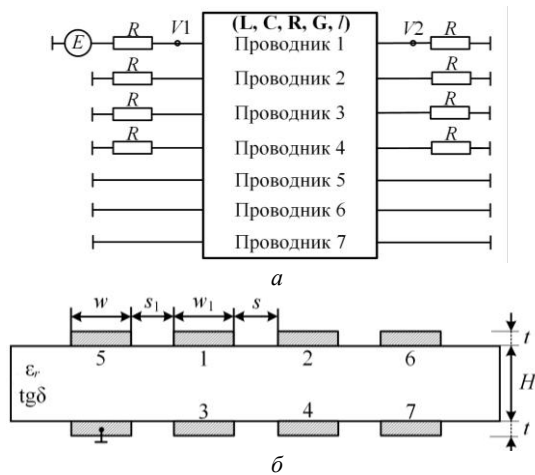


Рис. 6. Эквивалентная схема включения (а) и поперечное сечение (б) структуры с трехкратным МР на ДПП

Параметры структуры: $s = 500$ мкм, $s_1 = 1000$ мкм, $w = 1500$ мкм, $w_1 = 500$ мкм, $H = 510$ мкм, $t = 35$ мкм, $\epsilon_r = 4,5$, $l = 1$ м. На рис. 7 представлены результаты анализа временных и частотных характеристик.

Видно, как и в предыдущих структурах, что импульс СШП-помехи разделится на 4 импульса меньшей амплитуды. При этом, как и в структуре № 2, интервалы между ними, а также их амплитуды не выровнены. Максимальное напряжение на выходе составило: до отказа – 0,095 В, после отказа – 0,13 В. В случае до отказа наблюдаются три частоты среза: 40, 110 и 125 МГц. В широком частотном диапазоне от 700 МГц до 5 ГГц ослабление составляет не менее 7 дБ.

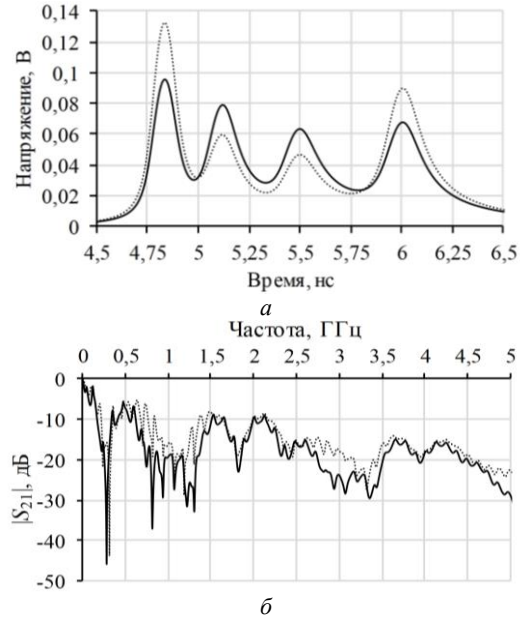


Рис. 7. Формы разложенных импульсов (а) и частотная зависимость $|S_{21}|$ (б) структуры с трехкратным МР на ДПП до (—) и после (···) отказа

Исследуемая структура с 3-кратным МР имеет высокую технологичность, так как для ее реализации достаточно технологии изготовления ДПП. При реализации такой ПП нет необходимости в переходных отверстиях (в отличие от структур на МПП). Структура имеет высокие показатели эффективности подавления СШП-помех. Низкая стоимость производства ДПП, а также высокая эффективность расширяют возможную область применения. Наибольшая плотность трассировки обеспечивает лучшие массогабаритные характеристики.

Трехкратное МР на ДПП с вертикальной симметрией (структура № 4)

Структура представляет собой 4-проводную ЛП на ДПП с вертикальной симметрией, где проводник 1 является резервируемым, а проводники 2–4 – резервными. Данная структура впервые опубликована в [35]. Эквивалентная схема включения и поперечное сечение представлены на рис. 8.

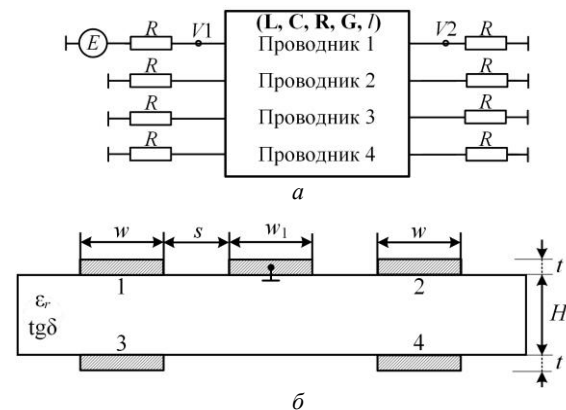


Рис. 8. Эквивалентная схема включения (а) и поперечное сечение (б) структуры с трехкратным МР на ДПП с вертикальной симметрией

Параметры структуры: $s = 400$ мкм, $w = 1500$ мкм, $w_1 = 500$ мкм, $H = 510$ мкм, $t = 35$ мкм, $\epsilon_r = 10,2$, $l = 1$ м. На рис. 9 представлены результаты анализа временных и частотных характеристик.

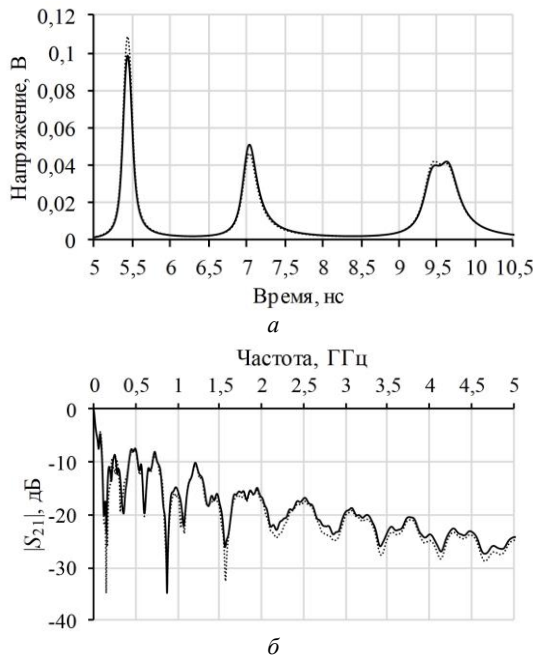


Рис. 9. Формы разложенных импульсов (а) и частотная зависимость $|S_{21}|$ (б) структуры с трехкратным МР на ДПП с вертикальной симметрией до (—) и после (···) отказа

Видно, что, как и в предыдущих структурах, импульс СШП помехи разделился на 4 импульса меньшей амплитуды. При этом интервалы между ними, а также их амплитуды не выровнены. Из-за сильной дисперсии импульсы 3 и 4 накладываются друг на друга. Наименьшая разность погонных задержек мод наблюдается между 3-м и 4-м импульсами. Максимальное напряжение на выходе составило: до отказа – 0,1 В, после отказа – 0,11 В. Частота среза составила 20 МГц. В широком частотном диапазоне от 500 МГц до 5 ГГц характеристика убывает вплоть до минус 26 дБ.

Исследуемая структура с трехкратным МР с вертикальной симметрией имеет высокую технологичность, так как для ее реализации достаточно технологии изготовления ДПП. Не самая высокая эффективность подавления СШП-помех (ниже, чем у структуры № 1) обусловлена нарушением симметрии поперечного сечения, что привело к изменению разностей погонных задержек между разложенными импульсами. Простота реализации дает средние значения в области применения. Массогабаритный параметр значительно ниже, чем у структуры № 3, из-за низкой плотности трассировки.

Пятикратное МР на МПП (структура № 5)

Структура представляет собой 7-проводную ЛП на МПП с симметрией по двум плоскостям, где проводник 1 является резервируемым, проводники 2–4 – резервными, а проводники 5–7 – опорными. Данная структура впервые опубликована в [35]. Эквива-

лентная схема включения и поперечное сечение представлены на рис. 10. Параметры структуры: $s = 700$ мкм, $w = 1500$ мкм, $w_1 = 500$ мкм, $h = 510$ мкм, $H = 992$ мкм, $t = 35$ мкм, $\epsilon_{r1} = 10,2$, $\epsilon_{r2} = 4,5$, $\text{tg}\delta_1 = 0,001$, $\text{tg}\delta_2 = 0,025$, $l = 1$ м.

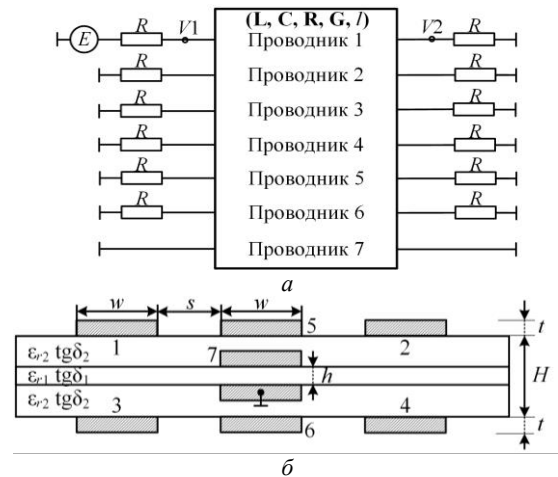


Рис. 10. Эквивалентная схема включения (а) и поперечное сечение (б) структуры с пятикратным МР на МПП

На рис. 11 представлены результаты анализа временных и частотных характеристик. Видно, что импульс СШП-помехи разделился на импульсы меньшей амплитуды. При этом из-за слабой связи между проводниками интервалы между ними, а также их амплитуды не выровнены. Сильная дисперсия не позволяет различить все 6 импульсов основных мод. Наименьшая разность погонных задержек мод наблюдается между 3-м и 4-м импульсами. Максимальное напряжение на выходе составило: до отказа – 0,12 В, после отказа – 0,12 В. Наблюдаются три частоты среза: 35, 75 и 100 МГц. В широком частотном диапазоне от 1000 МГц до 5 ГГц ослабление составляет не менее 16 дБ.

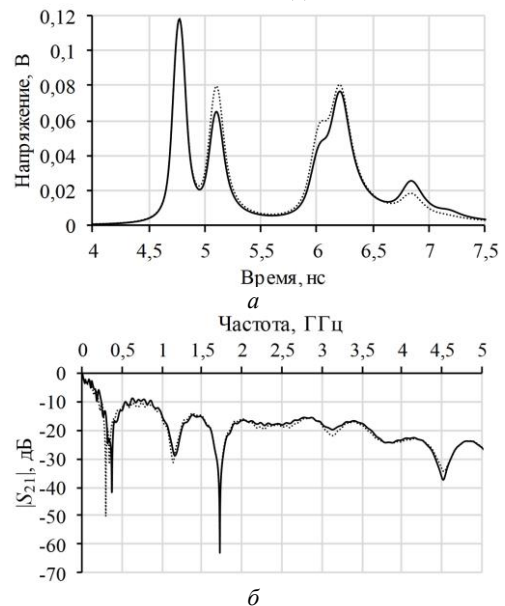


Рис. 11. Формы разложенных импульсов (а) и частотная зависимость $|S_{21}|$ (б) структуры с пятикратным МР на МПП до (—) и после (···) отказа

Структура с пятикратным МР на МПП имеет такую же технологичность что и структуры № 1 и № 2. Однако из-за того, что интервалы между разложенными импульсами небольшие, на малой длине импульсы могут накладываться. Поэтому эффективность подавления СШП-помех ниже, чем у структуры № 1. Применимость снижена относительно структур, реализованных на ДПП. Массогабаритный параметр не отличается от первой структуры из-за средней плотности трассировки и длины, достаточной для разложения помехового импульса.

Семикратное МР на МПП (структура № 6)

Структура представляет собой 9-проводную ЛП на МПП с симметрией по двум плоскостям, где проводник 1 является резервируемым, проводники 2–8 – резервными, а проводник 9 – опорным. Данная структура впервые опубликована в [36]. Эквивалентная схема включения и поперечное сечение представлены на рис. 12.

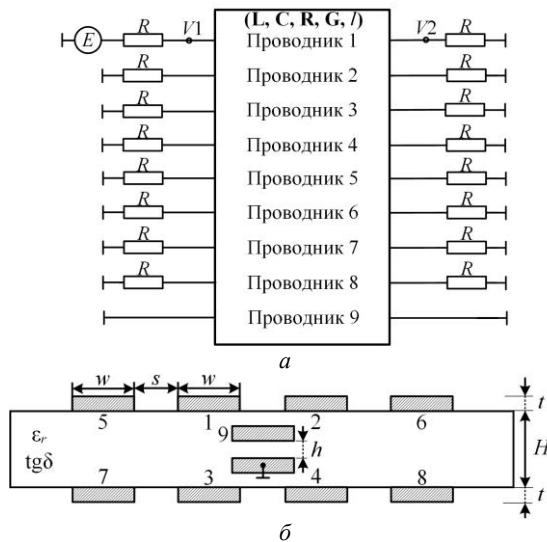


Рис. 12. Эквивалентная схема включения (а) и поперечное сечение (б) структуры с семикратным МР на МПП

Параметры структуры: $s = 600$ мкм, $w = 1200$ мкм, $w_1 = 1000$ мкм, $H = 992$ мкм, $t = 35$ мкм, $\epsilon_r = 4,5$, $\text{tg}\delta = 0,025$, $l = 2$ м.

На рис. 13 представлены результаты анализа временных и частотных характеристик. Видно, что импульс СШП-помехи разделился на импульсы меньшей амплитуды. Из-за слабой связи между проводниками интервалы между импульсами, а также их амплитуды не выровнены. Наименьшая разность погонных задержек мод наблюдается между 7-м и 8-м импульсами. Максимальное напряжение на выходе составило: до отказа – 0,049 В, после отказа – 0,044 В. Наблюдаются три частоты среза: 45, 55 и 75 МГц. В широком частотном диапазоне от 900 МГц до 5 ГГц характеристика убывает вплоть до минус 22 дБ.

Структура с семикратным МР на МПП имеет схожую технологичность со структурой № 1. Однако ее эффективность оказалась ниже, так как интервалы между импульсами и их амплитуды значительно отличаются друг от друга. Применимость снижена

относительно структур, реализованных на ДПП. Среднее значение массогабаритных показателей обусловлено средней плотностью трассировки и длиной, достаточной для разложения импульса СШП-помехи.

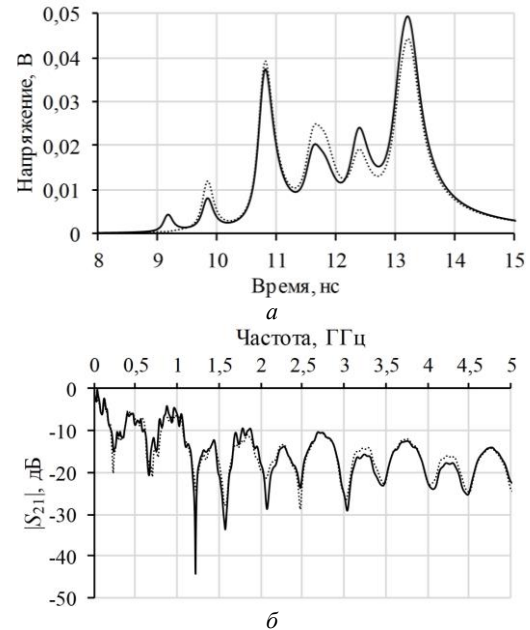


Рис. 13. Формы разложенных импульсов (а) и частотная зависимость $|S_{21}|$ (б) структуры с семикратным МР на МПП до (—) и после (···) отказа

Структура с семикратным МР и круговым сечением (структура № 7)

Структура представляет собой 8-проводную ЛП с круговым сечением с симметрией по двум плоскостям, где проводник 1 является резервируемым, а проводники 2–8 – резервными. Данная структура впервые опубликована в [36]. Эквивалентная схема включения и поперечное сечение представлены на рис. 14.

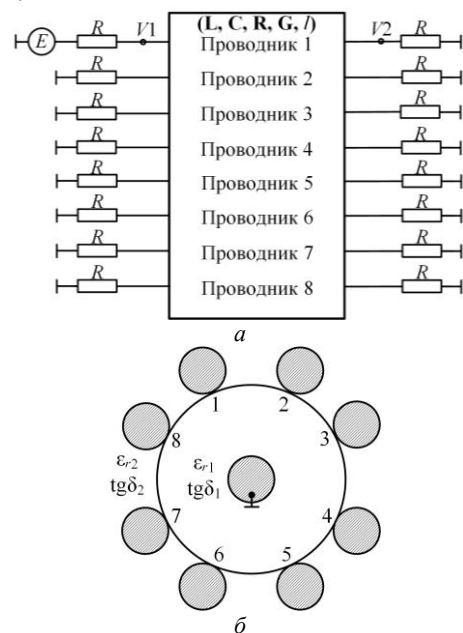


Рис. 14. Эквивалентная схема включения (а) и поперечное сечение (б) структуры с семикратным МР и круговым сечением

Параметры структуры: радиус проводников 0,4 мм, радиус диэлектрика 1,6 мм, $\epsilon_r = 5$, $\text{tg}\delta = 0,025$, $l = 2$ м. Такое расположение проводников (попарное сближение) и их параметры выбраны в качестве первого приближения к реальным параметрам. На рис. 15 представлены результаты анализа временных и частотных характеристик.

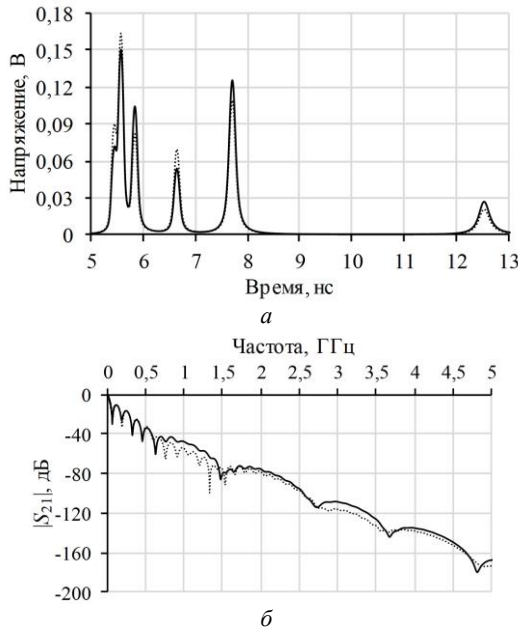


Рис. 15. Формы разложенных импульсов (а) и частотная зависимость $|S_{21}|$ (б) структуры с семикратным МР и круговым сечением до (—) и после (···) отказа

Видно, что импульс СШП-помехи разделился на 6 импульсов меньшей амплитуды. При этом не наблюдаются два импульса, также соответствующие основным модам. Это обусловлено тем, что они приходят практически в одно время с другими импульсами. Как результат, можно видеть их суммарную амплитуду. Из-за слабой связи между проводниками интервалы между импульсами, а также их амплитуды не выровнены. Максимальное напряжение на выходе составило: до отказа – 0,15 В, после отказа – 0,16 В. Частота среза составила 75 МГц. В широком частотном диапазоне от 1000 МГц до 5 ГГц характеристика убывает вплоть до –160 дБ.

Структура с семикратным МР и круговым сечением имеет низкую технологичность при единичном производстве, в то же время этот параметр может быть улучшен при серийном производстве. Эффективность подавления СШП-помех немного ниже, чем у структуры № 1. Из-за того, что структуру нельзя реализовать на ПП, ее область применения довольно узкая (соединения между модулями и сборками). Массогабаритные показатели низкие, так как площадь поперечного сечения такой структуры большая.

Структура с семикратным МР с проводниками на торцах ПП (структура № 8)

Структура представляет собой 8-проводную ЛП с проводниками на торцах ПП с симметрией по двум

плоскостям, где проводник 1 является резервируемым, а проводники 2–8 – резервными. Данная структура впервые опубликована в [36]. Эквивалентная схема включения представлена на рис. 14, а, а поперечное сечение – на рис. 16.

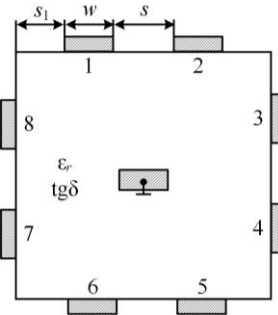


Рис. 16. Поперечное сечение структуры с семикратным МР с проводниками на торцах ПП

Параметры структуры: $s = 200$ мкм, $s_1 = 200$ мкм, $w = 200$ мкм, $t = 35$ мкм, $\epsilon_r = 10,2$, $\text{tg}\delta = 0,025$, $l = 10$ м. На рис. 17 представлены временные и частотные характеристики.

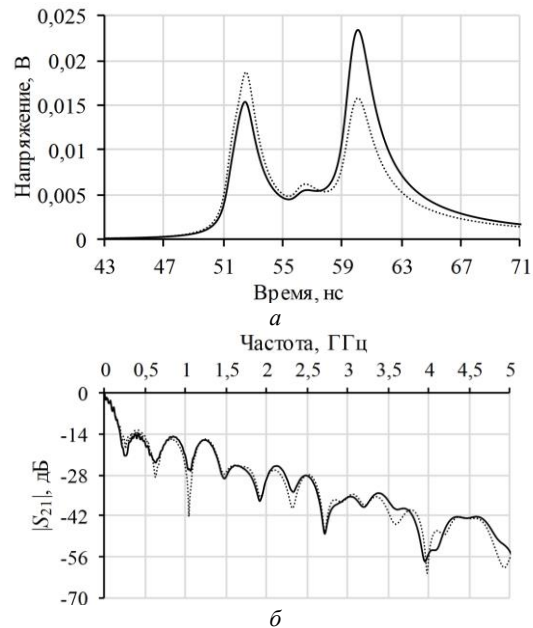


Рис. 17. Формы разложенных импульсов (а) и частотная зависимость $|S_{21}|$ (б) структуры с семикратным МР с проводниками на торцах до (—) и после (···) отказа

Видно, что импульс СШП-помехи разделился на импульсы меньшей амплитуды. При этом все основные восемь импульсов нельзя различить из-за дисперсии. Определить их время прихода можно лишь с помощью модального анализа. Как и в случае со структурами № 6 и № 7, из-за слабой связи между проводниками интервалы между импульсами, а также их амплитуды не выровнены. Максимальное напряжение на выходе составило: до отказа – 0,23 В, после отказа – 0,019 В (наименьшее значение из всех рассматриваемых структур). Частота среза составила 22 МГц. В широком частотном диапазоне от 900 МГц до 5 ГГц характеристика значительно убывает.

Структура с семикратным МР с проводниками на торцах ПП имеет высокую стоимость. Длина, на которой выполняется разложение помехового импульса, примерно в 2,5 раза больше, чем у структуры № 1. Также, интервалы импульсов разложения и их амплитуды значительно отличаются друг от друга. При этом эффективность подавления СШП-помех такой структуры ниже, чем у первой структуры (в случае без потерь). Расположение сигнальных проводников накладывает значительные ограничения на область применения. Массогабаритные показатели низкие, так как площадь поперечного сечения такой структуры большая.

Анализ N -норм до и после отказа

В табл. 2 представлены вычисленные N -нормы для структур с многократным МР до и после отказа. Из полученных результатов видно, что все исследуемые структуры существенно ослабляют импульс СШП помехи как до, так и после отказа. С точки зрения N_1 достигается минимальное ослабление в 6,67 раз для структур до отказа и 5,34 раза для структур после отказа. Из-за разложения входного импульса на импульсы меньшей амплитуды, а также из-за влияния потерь значение N_2 значительно уменьшилось для всех структур. Наилучшее ослабление наблюдается для структуры № 2 до отказа (до 205 раз), наихудшее – для структуры № 7 до отказа (до 10 раз). Значения N_3 практически не меняются во всех рассматриваемых случаях и структурах. С точки зрения N_4 наблюдается ослабление СШП импульса не менее чем в 3,55 раза. Среднедействующее

значение напряжения на выходе в узле V_2 значительно меньше, чем в узле V_1 . Так, наилучшее ослабление N_5 наблюдается для структуры № 8 до отказа (до 7,58 раза), наихудшее – для структуры № 8 после отказа (до 2,2 раза).

Таким образом, можно сделать вывод, что вероятность выхода из строя компонентов оканчивающих структуры с МР, будет значительно ниже, чем в структурах с классическим резервированием. Применение МР позволяет уменьшить риски, связанные с функциональными сбоями, вызванными СШП помехами. Однако полученные характеристики дают лишь относительную оценку того или иного типа повреждения. Необходимо учитывать конструктивные и схемотехнические решения конкретных узлов и межсоединений для расчета показателей надежности.

Заключение

В работе выполнены анализ и систематизация способов многократного МР. Все представленные способы (являются запатентованными изобретениями) относятся к конструированию ПП, конкретно – к способам их компоновки и трассировки. В результате достигается уменьшение восприимчивости резервируемой цепи к внешним кондуктивным помехам. Исследуемые в данной работе способы МР на основе симметричных структур обладают различными конструктивными особенностями, электрическими и массогабаритными характеристиками, а также областью применения. Результаты проведенной оценки восьми способов МР приведены на рис. 18.

Таблица 2

Вычисленные N -нормы для структур с многократным МР до и после отказа

Норма	Структура								
	СШП-помеха	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
N_1 до отказа	1	0,081	0,125	0,095	0,099	0,118	0,049	0,150	0,023
N_1 после отказа		0,086	0,187	0,130	0,108	0,118	0,044	0,163	0,018
N_2 до отказа	$2,126 \cdot 10^{10}$	$6,404 \cdot 10^8$	$1,037 \cdot 10^8$	$1,009 \cdot 10^9$	$1,092 \cdot 10^9$	$1,278 \cdot 10^9$	$1,956 \cdot 10^8$	$2,131 \cdot 10^9$	$1,290 \cdot 10^7$
N_2 после отказа		$6,393 \cdot 10^8$	$1,468 \cdot 10^9$	$9,792 \cdot 10^8$	$1,090 \cdot 10^9$	$1,278 \cdot 10^9$	$1,933 \cdot 10^8$	$2,086 \cdot 10^9$	$1,954 \cdot 10^9$
N_3 до отказа	$9,908 \cdot 10^{-11}$	$9,551 \cdot 10^{-11}$	$9,597 \cdot 10^{-11}$	$9,563 \cdot 10^{-11}$	$9,425 \cdot 10^{-11}$	$9,580 \cdot 10^{-11}$	$9,366 \cdot 10^{-11}$	$9,741 \cdot 10^{-11}$	$9,546 \cdot 10^{-11}$
N_3 после отказа		$9,733 \cdot 10^{-11}$	$1,050 \cdot 10^{-10}$	$9,699 \cdot 10^{-11}$	$9,485 \cdot 10^{-11}$	$9,761 \cdot 10^{-11}$	$9,481 \cdot 10^{-11}$	$9,795 \cdot 10^{-11}$	$9,698 \cdot 10^{-11}$
N_4 до отказа	$3,657 \cdot 10^{-10}$	$9,723 \cdot 10^{-11}$	$9,642 \cdot 10^{-11}$	$9,711 \cdot 10^{-11}$	$9,603 \cdot 10^{-11}$	$9,685 \cdot 10^{-11}$	$9,555 \cdot 10^{-11}$	$1,243 \cdot 10^{-10}$	$2,056 \cdot 10^{-10}$
N_4 после отказа		$1,778 \cdot 10^{-10}$	$1,118 \cdot 10^{-10}$	$1,077 \cdot 10^{-10}$	$9,973 \cdot 10^{-11}$	$1,606 \cdot 10^{-10}$	$1,268 \cdot 10^{-10}$	$1,370 \cdot 10^{-10}$	$3,349 \cdot 10^{-10}$
N_5 до отказа	$9,106 \cdot 10^{-6}$	$2,177 \cdot 10^{-6}$	$1,845 \cdot 10^{-6}$	$2,021 \cdot 10^{-6}$	$1,598 \cdot 10^{-6}$	$1,923 \cdot 10^{-6}$	$1,336 \cdot 10^{-6}$	$2,507 \cdot 10^{-6}$	$1,207 \cdot 10^{-6}$
N_5 после отказа		$2,186 \cdot 10^{-6}$	$2,031 \cdot 10^{-6}$	$1,971 \cdot 10^{-6}$	$1,595 \cdot 10^{-6}$	$1,947 \cdot 10^{-6}$	$1,324 \cdot 10^{-6}$	$2,464 \cdot 10^{-6}$	$4,118 \cdot 10^{-6}$

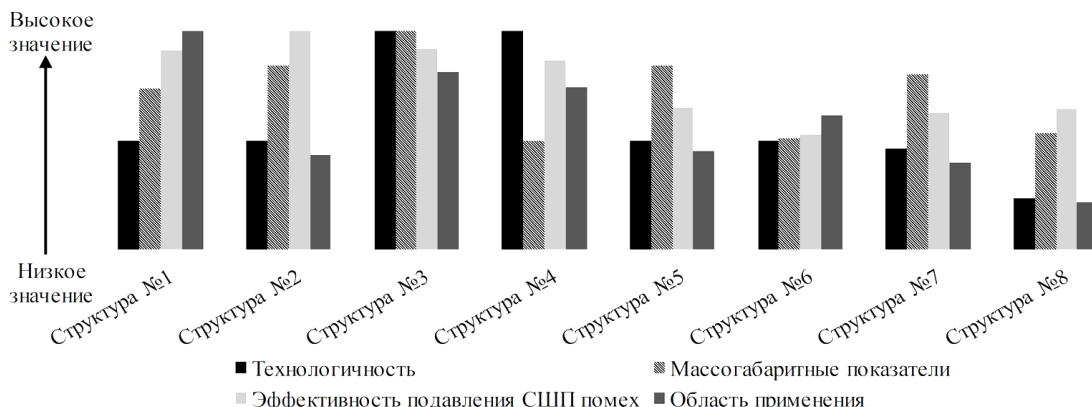


Рис. 18. Сравнительная оценка симметричных структур с многократным МР

С точки зрения технологичности лучшими являются структуры № 3 и № 4. Это обусловлено тем, что для их реализации достаточно технологии ДПП. Также существенным плюсом является то, что в таких структурах отсутствует необходимость в сквозных металлизированных отверстиях или торцевых проводниках. Структуры № 1, № 2, № 5 и № 6 обладают средними показателями, так как для их реализации требуется технология МПП, повышающая сложность изготовления. В общем случае структура № 7 обладает меньшей технологичностью, так как ее можно легко оптимизировать под существующие кабельные изделия. Структура № 8 является в данном случае наихудшей, так как для ее реализации необходимы технология МПП и торцевые проводники.

При анализе массогабаритных характеристик исследуемых способов многократного МР выявлено, что структура № 3 также является лучшей. Это обусловлено тем, что в такой структуре плотность трассировки резервируемого и резервных цепей наибольшая. Структуры № 1, № 2, № 5 и № 7 обладают схожими показателями (одинаковая плотность трассировки, идентичные материалы). Структуры № 4, № 6 и № 8 обладают схожими низкими показателями. В общем случае это обусловлено низкой плотностью трассировки, а также большой длиной.

При квазистатическом анализе эффективности подавления СШП-помех выявлено, что лучшей является структура № 2 из-за больших временных интервалов между импульсами, а также выровненных амплитуд. Дополнительным преимуществом этой структуры является экранирование резервируемого и резервных проводников. Структуры № 1, № 3 и № 4 обладают также хорошими показателями. Оптимальные структуры способны разложить СШП-помеху на 4 малых импульса меньшей амплитуды с большими временными интервалами между ними. Структуры № 5–8 имеют средние показатели из-за слабой связи между резервируемым и резервными цепями. Временные интервалы разложенных импульсов, а также их амплитуды не выровнены. Тем не менее все рассмотренные структуры способны эффективно защитить узлы и компоненты РЭА от СШП-помех.

С точки зрения области применения структура № 1 является лучшей. Это обусловлено следующими факторами: в данной структуре нет проблем с размещением компонентов РЭА; высокая эффективность подавления СШП-помех; наибольшая полоса пропускания; возможность передачи питания по одному из опорных проводников. Структуры № 3 и № 4 обладают немного меньшими показателями области применения, так как в обеих структурах симметрия соблюдается лишь в одной плоскости. В результате эффективность подавления СШП-помех для разных цепей будет отличаться друг от друга. Структуры № 2, № 5, № 7 и № 8 обладают либо средними, либо низкими показателями области применения. Факторами, влияющими на это, являются: сложность в размещении компонентов РЭА; наложение

разложенных импульсов друг на друга; большая занимаемая площадь. Тем не менее для получения объективных показателей области применения необходимо проводить экспертную оценку рассмотренных способов МР в зависимости от решаемых задач.

Наконец, в работе приведены временные и частотные отклики после одного из возможных вариантов отказа (второй проводник отрывается на ближнем и дальнем концах структуры). Показано, что максимальное напряжение на выходе структур № 1, № 4–6 и № 8 практически не изменилось. В случае структур № 2, № 3 и № 7 изменение не превышает 30%. Во всех структурах полоса пропускания и общий характер $|S_{21}|$ не изменились. При этом детальное изучение характеристик структур с МР после всех возможных вариантов отказов заслуживает отдельного исследования и в данной работе не приводится.

Анализ публикаций по МР показал, что область применения структур с однократным МР выше, чем с многократным. Это связано с тем, что многократное МР требует более тщательного проектирования. На момент написания данной статьи не было опубликовано ни одной работы о применении МР в кабельных структурах с круглым сечением, что немного затронуто в данном обзоре. Также на данный момент нет публикаций или патентов, связанных с многократным МР в плоских кабелях. Между тем кабельные соединения применяются как на уровне одного устройства, так и на уровне сборок. Кабель с подобным поперечным сечением не является сложным в производстве. При этом разложение помехового импульса будет выполнено за счет большой длины.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90098.

Литература

1. Patel M.R. Spacecraft power systems. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 691 p.
2. Meany T. Functional safety and industrie 4.0 // 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC). – 2017. – P. 1–7.
3. Абрамешин А.Е. Функциональная безопасность бортовых систем летательных аппаратов при ЭСР / А.Е. Абрамешин, Л.Н. Кечиев // Технологии электромагнитной совместимости. – 2012. – № 3. – С. 1–11.
4. Reconfigurable UWB pulse generator based on pulse shaping in a nonlinear optical loop mirror and differential detection / T. Huang, S. Fu, J. Li, L.R. Chen, M. Tang, P. Shum, D. Liu // Optics Express. – 2013. – Vol. 21, No. 5. – P. 6401–6408.
5. UWB monocycle generator based on the non-linear effects of an SOA-integrated structure / V. Moreno, M. Rius, J. Mora, M. Muriel, J. Capmany // IEEE Photonics Technology Letters. – 2014. – Vol. 26, No. 7. – P. 690–693.
6. Rodrigues E. Industrial applications of power electronics / E. Rodrigues, R. Godina, E. Poursmaeil // Electronics. – 2020. – Vol. 9, No. 9. – P. 1–5.
7. Techniques and measures to achieve EMI resilience in mission-or safety-critical systems / D. Pissoot, J. Lannoo, J. Van Waes, A. Degraeve, J. Boydens // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2017. – Vol. 6, No. 4. – P. 107–114.

8. Functional Safety Test Strategy for Automotive Microcontrollers During Electro-Magnetic Compatibility Characterization / M. Unger, G. Fries, T. Steinecke, C. Waghmare, R. Ramaswamy // 2019 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo). – 2019. – P. 49–51.
9. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System Design and Assessment Notes. – 2014. – P. 1–43.
10. Gazizov A.T. Measurement and simulation of time response of printed modal filters with broad-side coupling / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotskii, T.R. Gazizov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2018. – Vol. 63, No. 3. – P. 270–276.
11. Белоусов А.О. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов / А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Доклады ТУСУР. – 2015. – Т. 3, № 37. – С. 124–128.
12. New Concept of Critical Infrastructure Strengthening / T.R. Gazizov, P.E. Orlov, A.M. Zabolotsky, S.P. Kuksenko // International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics. – Greece, Rhodes, 2016. – P. 1–3.
13. Шарафутдинов В.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 117–144.
14. Пат. 2 603 850 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – № 2 015 129 253 / 07; заявл. 16.07.15; опубл. 10.12.16, Бюл. № 34. – 7 с.
15. Пат. 2 603 851 РФ, МПК Н 04 В 15/00. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – № 2 015 129 263/07; заявл. 16.07.15; опубл. 10.12.16, Бюл. № 34. – 8 с.
16. Пат. 2 614 156 РФ, МПК Н 04 В 15/02, Н 03 Н 03/00, Н 05 К 03/36. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – № 2 015 137 532; заявл. 02.09.15; опубл. 23.03.17, Бюл. № 7. – 10 с.
17. Пат. 2 624 637 РФ, МПК Н 04 В 15/02, Н 03 Н 03/00, Н 05 К 03/36. Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – № 2 015 137 548; заявл. 02.09.15; опубл. 05.07.17, Бюл. № 7. – 10 с.
18. Пат. 2 603 848 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ резервирования плоских кабелей / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов и др. – № 2 015 156 667 / 07; заявл. 28.12.15; опубл. 10.12.16, Бюл. № 34. – 6 с.
19. Шарафутдинов В.Р. Новый способ трёхкратного резервирования межсоединений / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 26–30.
20. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / A.O. Belousov, A.V. Medvedev, E.B. Chernikova, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2021. – Vol. 13, No. 6. – P. 1–22.
21. Пат. 2 751 672 РФ, МПК Н 04 В 15/02, Н 01 Р 11/00. Способ компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием / Е.С. Жечев, А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов и др. – № 2 020 126 549; заявл. 10.08.20; опубл. 15.07.21, Бюл. № 20. – 9 с.
22. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration / A.O. Belousov, E.B. Chernikova, M.A. Samoylichenko, A.V. Nosov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2020. – Vol. 12, No. 7. – P. 1–39.
23. Baum C. E. Norms and eigenvector norms // Mathematics Notes. – 1979. – Vol. 63. – P. 1–42. – URL: <http://ece-research.unm.edu/summa/notes/Mathematics/0063.pdf> (дата обращения: 18.04.2022).
24. Giri D.V. High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications. – Cambridge, MA: Harvard University Press, 2004. – 198 p.
25. IEC 61000-4-33:2005 | IEC Webstore | Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4–33: Testing and measurement techniques – Measurement methods for high-power transient parameters [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/>, свободный (дата обращения: 18.04.2022).
26. Пат. 2 624 465 РФ, МПК Н 04 В 1/10. Четырёхпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от сверхкоротких импульсов / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко. – № 2 015 137 546; заявл. 02.09.15; опубл. 04.07.17, Бюл. № 19. – 9 с.
27. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях / Е.С. Жечев, Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2. – С. 162–179.
28. Zhechev Y.S. Multicriteria optimization of a four-layer reflection-symmetric modal filter parameters for ESD protection / Y.S. Zhechev, I.A. Ivantsov, A.M. Zabolotsky // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862, No. 1. – P. 012023–012028.
29. Черникова Е.Б. Зеркально-симметричная меандровая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 2. – С. 280–293.
30. Пат. 2 663 230 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трёхкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов. – № 2 017 133 045; заявл. 14.04.17; опубл. 02.08.18, Бюл. № 22. – 8 с.
31. Медведев А.В. Ослабление сверхкороткого импульса после отказа при трёхкратном модальном резервировании // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-25–2019): доклады (материалы конференции) 25-й Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 19.11.2019 г. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2019. – С. 162–167.
32. Using N -norms for analyzing symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / Y.S. Zhechev, A.V. Zhecheva, A.A. Kvasnikov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2021. – Vol. 13, No. 12. – P. 1–17.
33. Пат. 2 738 955 РФ, МПК Н 04 В 15/02. Способ трёхкратного резервирования межсоединений / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов, А.В. Медведев. – № 2 019 138 502; заявл. 27.11.19; опубл. 21.12.20, Бюл. № 36. – 8 с.
34. Самойличенко М.А. Модальные фильтры для защиты от сверхкоротких импульсов: исследование возможностей эффективного использования в двусторонних печатных платах // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 4. – С. 58–71.
35. Черникова Е.Б. Особенности модальных фильтров на основе зеркально-симметричных структур / Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов // Электронные средства и системы управления. – 2018. – № 1(1). – С. 269–272.
36. Черникова Е.Б. Модальное разложение сверхкороткого импульса в 8-проводных зеркально-симметричных структурах / Е.Б. Черникова, Т.Р. Газизов // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – № 9. – 17 с.

Жечев Евгений Сергеевич

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4469-7033>
Тел.: +7-913-102-34-89
Эл. почта: zhechev@tu.tusur.ru

Иванцов Илья Александрович

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-846-27-45
Эл. почта: iljas1408396@gmail.com

Козинец Артем Сергеевич

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-417-64-64
Эл. почта: yhy8881@mail.ru

Zhechev Y.S., Ivantsov I.A., Kozinets A.S.

Analysis and systematization of external tracing of printed conductors based on a symmetrical structure with modal filtering

To improve the functional safety of radioelectronic equipment, a redundancy of its components, parts, and interconnections is used. In contrast to the widely used cold redundancy, the modal reservation (MR) technology protects nodes and interconnections from ultra-wideband interference (UWB) by modal distortions. There are several approaches and methods to ensure a multiple MR. These methods have different design features, electrical and mass-size characteristics, and scope of application. Of special interest are the structures with conductor symmetry along two planes that allow realizing triple MR with the same efficiency of UWB interference suppression for any circuit. This work aims to present a novel analysis and systematization of methods of multiple MR based on symmetrical structures. To solve this problem, we evaluated the technology effectiveness of eight MR methods, their operability, and efficiency. The authors performed an evaluation of decomposed pulses for each structure before and after failure using N -norms. It is found that all investigated structures with modal redundancy allow to significantly attenuate the ultra-wideband pulse.

Keywords: modal reservation, electromagnetic compatibility, ultra-wideband interference, functional safety, reflection-symmetric structure, interconnections, transmission line.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-24-36

References

1. Patel M.R. *Spacecraft Power Systems*. USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2005, 691 p.
2. Meany T. Functional safety and industrie 4.0. *2017 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*. Killarney, Ireland, 2017, pp. 1–7.
3. Abrameshin A.E., Kechiev L.N. Functional safety of onboard systems of space craft at ESD. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2012, no. 3, pp. 1–11 (in Russ.)
4. Huang T., Fu S., Li J., Chen L.R., Tang M., Shum P., Liu D. Reconfigurable UWB Pulse Generator Based on Pulse Shaping in a Nonlinear Optical Loop Mirror and Differential Detection. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 5, pp. 6401–6408.
5. Moreno V., Rius M., Mora J., Muriel M., Capmany J. UWB Monocycle Generator Based on the Non-Linear Effects

of an SOA-Integrated Structure. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26, no. 7, pp. 690–693.

6. Rodrigues E., Godina R., Pouresmaeil E. Industrial Applications of Power Electronics. *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 9, pp. 1–5.

7. Pissoort D., Lannoo J., Van Waes J., Degraeve A., Boydens J. Techniques and measures to achieve EMI resilience in mission-or safety-critical systems. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 107–114.

8. Unger M., Fries G., Steinecke T., Waghmare C., Ramaswamy R. Functional Safety Test Strategy for Automotive Microcontrollers During Electro-Magnetic Compatibility Characterization. *2019 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo)*. Hangzhou, China, 2019, pp. 49–51.

9. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources. *System Design and Assessment Notes*, 2014, pp. 1–43.

10. Gazizov A.T., Zabolotskii A.M., Gazizov T.R. Measurement and Simulation of Time Response of Printed Modal Filters with Broad-Side Coupling. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 270–276.

11. Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotskii A.M. Multiconductor microstrip line as a modal filter for protection against ultrashort pulses. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, vol. 37, no. 3, pp. 124–128 (in Russ.).

12. Gazizov T.R., Orlov P.E., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P. New Concept of Critical Infrastructure Strengthening. *International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics*. Greece, Rhodes, 2016, pp. 1–5.

13. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R. Analysis of reservation methods based on modal filtration. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 117–144 (in Russ.).

14. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R. *Sposob trassirovki pechatnyh provodnikov cepej s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors of circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2603850, 2016) (in Russ.).

15. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R. *Sposob trassirovki pechatnyh provodnikov s dopolnitel'nyim dielektrikom dlya cepej s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors with additional dielectric for circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2603851, 2016) (in Russ.).

16. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.M., Zabolotskij A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob trassirovki pechatnyh provodnikov s dopolnitel'nyim dielektrikom dlya cepej s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent RF, no. 2614156, 2017) (in Russ.).

17. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.M., Zabolotskij A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob vnutrennej komponovki pechatnyh plat dlya cepej s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent RF, no. 2624637, 2017) (In Russ.).

18. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.M., Zabolotskij A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob rezervirovaniya ploskih kabelej* [Method of flat cables backing up]. Patent RF, no. 2603848, 2016) (in Russ.).

19. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R. New method for triple reservation of interconnects. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 26–30 (in Russ.).

20. Belousov A.O., Medvedev A.V., Chernikova E.B., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation. *Symmetry*, 2021, vol. 13, no. 6, pp. 1–22.

21. Zhechev Y.S., Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M., Chernikova E.B. *Sposob komponovki pechatnykh provodnikov dlya cepej s modal'nykh rezervirovaniem* [Method for arranging printed conductors for circuits with modal redundancy]. Patent RF, no. 2751672, 2021) (in Russ.).
22. Belousov A.O., Chernikova E.B., Medvedev A.V., Samoylichenko M.A., Nosov A.V., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 7, pp. 1–39.
23. Baum C. Norms and eigenvector norms. *Mathematics Notes*, 1979, Vol. 63, pp. 1–42. Available at: <http://ece-research.unm.edu/summa/notes/Mathematics/0063.pdf> (Accessed: April 18, 2022).
24. Giri D.V. *High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications*. Cambridge, MA: Harvard University Press. Publ., 2004. 198 p.
25. IEC 61000–4–33:2005 | IEC Webstore | Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4–33: Testing and measurement techniques – Measurement methods for high-power transient parameters. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/> (Accessed: April 18, 2022).
26. Zabolotskii A.M., Gazizov T.R., Kuksenko S.P. *Chetyrehprovodnaya zerkal'no-simmetrichnaya struktura, zashchishchayushchaya ot sverhkorotkikh impul'sov* [Four-way mirror-symmetrically structure, protecting from ultrashort impulses]. Patent RF, no. 2624465, 2017) (in Russ.).
27. Zhechev Y.S., Chernikova E.B., Belousov A.O., Gazizov T.R. Experimental research of a reflection symmetric modal filter in the time and frequency domains. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 162–179 (in Russ.).
28. Zhechev Y.S., Ivantsov I.A., Zabolotsky A.M. Multicriteria optimization of a four-layer reflection-symmetric modal filter parameters for ESD protection. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1862, no. 1, pp. 012023–012028.
29. Chernikova E.B. Reflection Symmetric Meander Line Protecting against Ultrashort Pulses. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 2, pp. 280–293 (in Russ.).
30. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R. *Sposob trekhkratnogo rezervirovaniya cepej v mnogoslojnykh pechatnykh platah* [Method of circuit triple reservation in multilayered printed circuit boards]. Patent RF, no. 2663230, 2018) (in Russ.).
31. Medvedev A.V. *Oslablenie sverhkorotkogo impul'sa posle otказа pri trekhkratnom modal'nom rezervirovanii* [Ultra-short pulse attenuation after failure with triple modal redundancy]. *Prirodnye i intellektualnye resursy Sibiri* (SIBRESURS-25-2019): doklady (materialy konferentsii) 25-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. [Proceedings of the 25th international scientific-practical conference]. Tomsk, TUSUR Publ., 2019, pp. 162–167 (in Russ.).
32. Zhechev Y.S., Zhecheva A.V., Kvasnikov A.A., Zabolotsky A.M. Using N -norms for analyzing symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation. *Symmetry*, 2021, vol. 13, no. 12, pp. 1–17.
33. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R., Medvedev A.V. *Sposob tryohkratnogo rezervirovaniya mezhsoedinenij* [Method of triple backup of interconnections]. Patent RF, no. 2738955, 2020) (in Russ.).
34. Samoylichenko M.A. Modal filters for protection against ultrashort pulses: a study of the possibilities of effective use in double-sided printed circuit boards. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 4, pp. 58–71 (in Russ.).
35. Chernikova E.B. *Osobennosti modal'nykh fil'trov na osnove zerkal'no-simmetrichnykh struktur* [Features of modal filters based on reflection-symmetric structures]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: doklady (materialy konferentsii 14-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii)*. [Proceedings of the 14th international scientific-practical conference]. Tomsk, TUSUR Publ., 2018, pp. 269–272 (in Russ.).
36. Chernikova E.B., Gazizov T.R. Modal decomposition of the ultrashort pulse in 8-conductor reflection symmetric structures. *Journal of Radio Electronics*, 2020, no. 9, pp. 1–17 (in Russ.).

Yevgeniy S. Zhechev

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4469-7033>
Phone: +7-913-102-34-89
Email: zhechev@tu.tusur.ru

Ilya I. Ivantsov

Student, Department of Television and Control, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-846-27-45
Email: iljas1408396@gmail.com

Artem S. Kozinets

Student, Department of Television and Control, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-417-64-64
Email: yhy8881@mail.ru

УДК 621.391.825

В.П. Костелецкий

Обзор гибридных фильтров для защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных помех

Актуальной проблемой обеспечения электромагнитной совместимости является защита радиоэлектронных средств (РЭС) от кондуктивных помех, которые проникают в электронные узлы РЭС через проводники сигнальных и силовых цепей. Для обеспечения помехозащищенности РЭС применяют электрические фильтры. Однако такое решение обладает недостатком, связанным с тем, что электрический фильтр является устройством, разработанным под конкретные цели, и часто не подходит для решения смежных задач. Совместное использование электрических фильтров различного назначения и применения, т.е. их гибридное исполнение, позволяет повысить эффективность таких устройств. Особенностью гибридных фильтров является то, что характеристики используемых в его составе электрических фильтров компенсируют недостатки друг друга. В работе произведен обзор и сравнительный анализ гибридных помехозащитных фильтров, который может быть использован при проектировании РЭС и организации эффективной защиты от кондуктивных помех.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, устройства защиты, гибридный фильтр, сверхкороткий импульс, кондуктивная помеха, синфазный режим, дифференциальный режим, модальная фильтрация.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-37-47

Развитие радиоэлектронных средств (РЭС) приводит к повсеместному использованию электроники, в том числе в критичных отраслях, например, военной, атомной, медицинской и космической. Эксплуатация электронного оборудования в условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки, а также в условиях, когда отсутствует возможность его обслуживания, может привести к выходу из строя РЭС и поставить под вопрос успех проекта или привести к человеческим жертвам. В связи с этим предъявляются повышенные требования к надежности РЭС и растет важность соблюдения требований электромагнитной совместимости (ЭМС) [1].

При разработке РЭС необходимо учитывать следующие факторы: устойчивость к вибрациям, перегрузке, перепадам температур, влажность, стабильность параметров РЭС по мере набора суммарной дозы облучения и выживаемость после контакта с тяжелыми заряженными частицами [2]. В погоне за быстродействием происходит увеличение верхней частоты спектра рабочих сигналов. Кроме того, вследствие миниатюризации и уменьшения уровня питающих напряжений уменьшается запас помехоустойчивости электронных устройств [3, 4]. При этом РЭС часто приходится работать в ограниченном пространстве, что приводит к увеличению плотности компоновки. Все эти факторы ухудшают ЭМС РЭС [5, 6]. Поэтому с каждым годом требования стандартов по ЭМС ужесточаются как в отношении порогов восприимчивости, так и в расширении частотного диапазона [7, 8]. Это четко проследивается на примере пересмотров военного стандарта по ЭМС Министерства обороны США MIL-STD-461 [9]. Несмотря на наличие отечественных стандартов по ЭМС, инженеры нередко используют этот стандарт в дополнение к методикам и правилам при испытаниях оборудования.

Помимо техногенного ухудшения ЭМС, существует вероятность преднамеренных электромагнит-

ных воздействий специальными электротехническими средствами [10, 11]. Актуальность данной проблемы подчеркивают новые исследования в данной области [12–15]. Некоторые исследования на тему преднамеренных воздействий показывают, что даже малые амплитуды помехи могут приводить к нарушениям нормального функционирования РЭС [16]. Уязвимость РЭС к помеховым воздействиям актуализирует такое направление ЭМС, как защита от кондуктивных помех, которые, в свою очередь, могут обладать узкой и широкой полосой спектра [17]. Одним из наиболее опасных видов помех являются сверхширокополосные электромагнитные импульсы [18]. Отдельно стоит выделить сверхкороткие импульсы (СКИ) наносекундного и субнаносекундного диапазонов.

Спектр СКИ-диапазонов перекрывает широкий диапазон частот, вследствие чего значительная часть частотных компонент спектра такого импульса преодолевает традиционные схемотехнические и конструктивные средства защиты от помех [19]. Принято считать, что кондуктивные помехи распространяются в трех режимах: несимметричном, синфазном и дифференциальном. Требования к уровням таких помех регламентируют современные стандарты по обеспечению ЭМС, например EN 55022 [20]. Распространяясь по электрическим цепям или вдоль направляющих систем, СКИ могут привести к электрическому пробое диэлектриков и полупроводников, в результате происходит изменение электрических параметров, в том числе приводящее к повреждению электронного оборудования [21].

Для борьбы с кондуктивными помехами часто применяют схемотехнические и конструктивные средства защиты. Под схемотехническими средствами защиты от кондуктивных помех подразумеваются фильтры на компонентах с распределенными и сосредоточенными параметрами, полупроводниковые ограничители напряжения помех, оптическая,

емкостная и трансформаторная гальванические развязки, а также газоразрядные устройства. К конструктивным средствам защиты относятся методы обеспечения регулярности линий передачи, защитные экраны, различные схемы заземления, уменьшение импеданса цепей питания и оптимальные настройки оборудования, которые позволяют РЭС нормально функционировать в заданной обстановке [22]. Помимо этого, существует отдельный вид перспективных помехозащитных устройств, которые специализируются на СКИ. В основе работы таких устройств используются модальные искажения [23]. К таким устройствам относят защитные меандровые линии (МЛ) [24] и модальные фильтры (МФ) [25].

Также существуют МФ для работы в синфазном и дифференциальном режимах [26]. Конструктивно такие защитные устройства допускают использование в самых жестких условиях эксплуатации. А благодаря простоте конструкции легко реализуются в рамках типового технологического процесса производителей печатных плат. Между тем актуально применение гибридных устройств защиты, которые, как правило, обладают лучшими характеристиками, перекрывая недостатки средств фильтрации, из которых они спроектированы. Это может существенно повысить помехозащищенность РЭС, следствием чего станет бесперебойное функционирование критически важного оборудования. Авторам не известен обзор гибридных средств защиты. Однако это является актуальным и важным исследованием, так как такой материал позволяет систематизировать существующие образцы гибридных помехозащитных устройств и может быть полезен при проектировании РЭС в сфере организации эффективной защиты от кондуктивных помех.

Цель работы – выполнить анализ основных вариаций гибридных помехозащитных фильтров, защищающих от кондуктивных помех. В статье рассматриваются следующие гибриды: активного фильтра (АФ) и пассивного фильтра (ПФ) на дискретных элементах, гибрида фильтра на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и LC-резонатора, гибрида МФ и МЛ, а также гибрида МФ и ПФ на дискретных элементах.

Гибрид АФ и фильтра на дискретных элементах

Фильтры с активным компонентом применяют в цепях питания со значениями токов от единиц до десятков ампер при рабочих напряжениях от десятков до сотен вольт. Поэтому элементы схемы имеют большую установленную мощность и, как следствие, высокую стоимость. В свою очередь, ПФ относятся к традиционным устройствам защиты, просты в изготовлении и широко распространены, однако обладают ограниченными функциональными возможностями и являются неуправляемыми. При гибридизации АФ и ПФ АФ выполняют роль исполнительного органа регулятора параметров ПФ. При этом мощность АФ снижается, в связи с чем устанавливается баланс между величиной добротности

ПФ и его устойчивостью в динамических режимах работы. Также гибридное исполнение АФ и ПФ позволяет автоматически корректировать параметры фильтра во время работы. Гибрид АФ и ПФ используют для борьбы с синфазными и дифференциальными помехами, которые образуются в современных системах электропитания за счет быстрых переходных процессов, связанных с ключевым режимом работы.

В [27, 28] предложен гибридный фильтр, представляющий собой активную схему на операционном усилителе с дискретным пассивным компонентом в виде синфазного дросселя, который состоит из двух обмоток (L_{C1} и L_{C2}). Структурная схема такого гибрида показана на рис. 1. На рис. 2 показаны результаты экспериментальных измерений уровня синфазной помехи, а также уровень, регламентируемый стандартом EN55022QP. Гибридный фильтр с похожим принципом работы представлен в [29]. Такой фильтр работает следующим образом: АФ обладает собственной обмоткой-монитором (L_M), которая отслеживает магнитные потоки, вызванные синфазной помехой в магнитопроводе синфазного дросселя. Затем на выходе схемы формируются сигналы, противофазные помехе синфазного дросселя, тем самым уменьшая ее уровень.

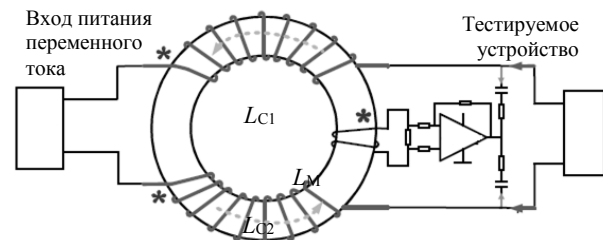


Рис. 1. Структурная схема гибридного фильтра с синфазным дросселем

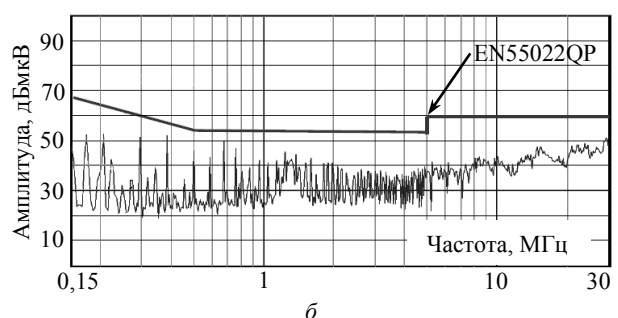
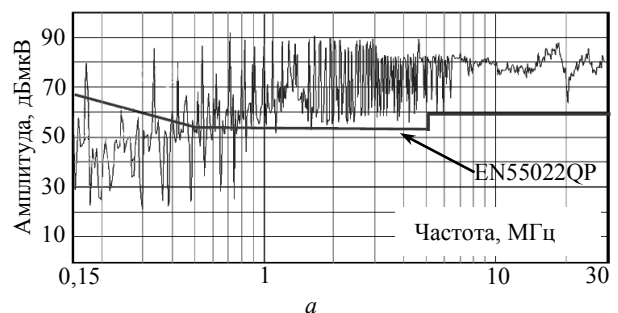


Рис. 2. Помеха без гибридного фильтра (а) и с гибридным фильтром (б) [27]

Гибрид АФ и дискретного компонента позволяет уменьшить уровень помех в полосе частот от 150 кГц до 30 МГц в синфазном режиме. Из рис. 2 видно, что использование такого гибрида позволяет сделать амплитуду помехи ниже уровня кривой, показывающей допустимые значения. Это позволяет пройти испытания по ЭМС в соответствии со стандартом, регламентирующим радиопомехи от оборудования информационных технологий EN55022Q в синфазном режиме.

В [30] приведен гибрид АФ и ПФ на элементах с сосредоточенными параметрами. Схемы активной и пассивной частей фильтра показаны на рис. 3. Результаты экспериментальных исследований влияния гибрида на уровень синфазных помех показаны на рис. 4. Коэффициент усиления в такой схеме определяется номиналами ее компонентов, которые вычисляются по формулам, приведенным в [30]. Принцип работы заключается в использовании техники прямого подавления шума. Через обмотку трансформатора тока ($L_{\text{трансформатора}}$), отслеживается напряжение помехи, при изменении ее уровня схема, управляя транзисторами, шунтирует помеху через RC-цепочку на опорный потенциал. Таким образом, схема оказывает влияние на уровень помехового напряжения в шине питания. При этом пассивная часть фильтра не претерпевает изменений.

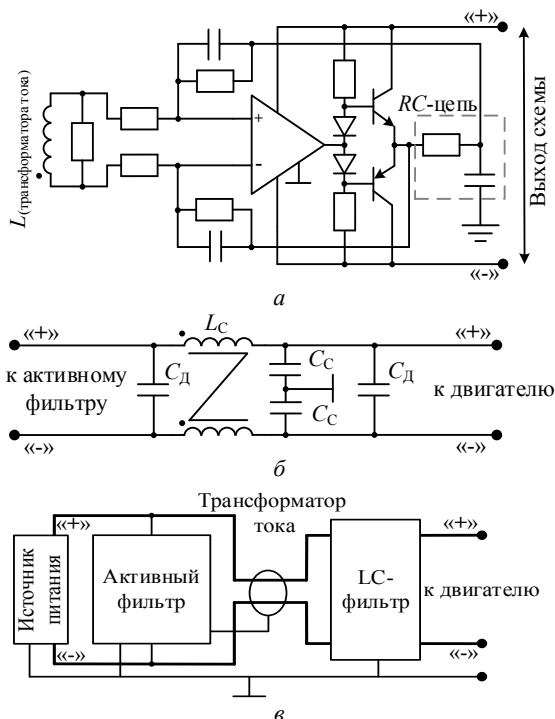


Рис. 3. Активная (а) и пассивная (б) части гибридного фильтра а также способ их соединения (в) [30]

Этот гибрид позволяет ослабить токи синфазной помехи в диапазоне частот от 10 кГц до 10 МГц. Примечательно, что на разных частотах составные части фильтра обладают разной эффективностью. Так, на рис. 4 отмечены примерные диапазоны частот, на которых компоненты фильтра оказывают наибольшее влияние на помеху.

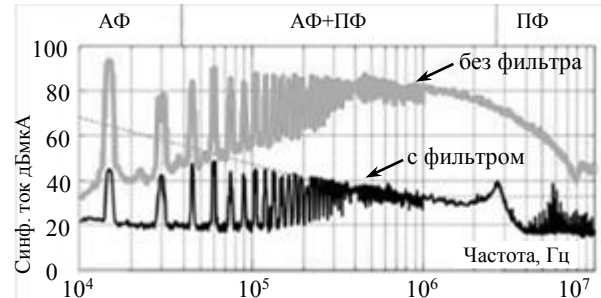


Рис. 4. Измеренные токи синфазной помехи [30]

В [31] предложен гибрид, объединяющий ПФ в планарном исполнении, интегрированный в конструкцию печатной платы (ПП), и АФ, элементы которого располагаются на внешнем слое ПП. Конденсаторы такого ПФ выполнены с применением диэлектрика С-ply, а сердечник магнитопровода – из ферритовой вставки. На рис. 5 изображена электрическая принципиальная схема гибрида. Элементы пассивного фильтра обозначены индексом П, а все остальные компоненты относятся к активному фильтру.

Экспериментальные результаты применения ПФ и гибрида приведены на рис. 6. Похожий гибрид представлен в [32, 33]. АФ через развязывающие керамические конденсаторы отслеживает уровень дифференциальной помехи.

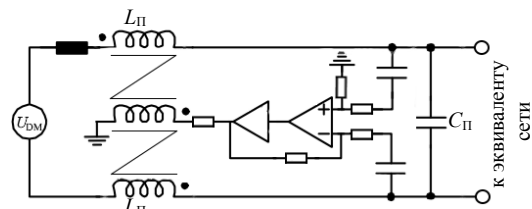


Рис. 5. Схема интегрированного гибридного фильтра [31]

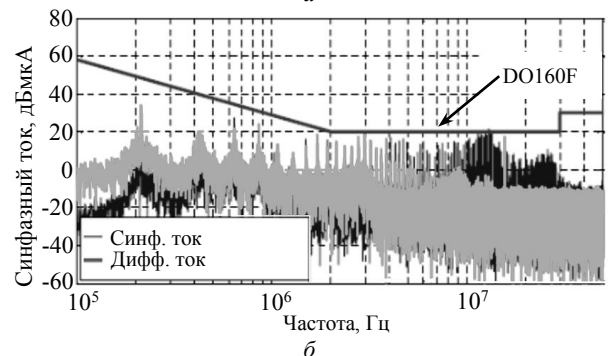
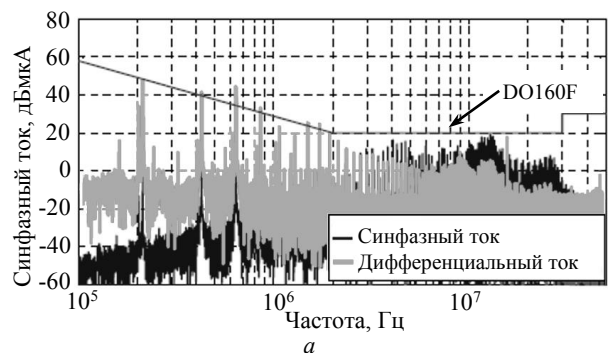


Рис. 6. Ток синфазной и дифференциальной помех после ПФ (а), после гибрида АФ и ПФ (б) [31]

Такой гибрид позволяет значительно снизить уровень помех в синфазном и дифференциальном режимах, в диапазоне частот от 100 кГц до 10 МГц для соответствия стандарту DO-160, определяющему процедуру испытаний авионики.

Таким образом, гибрид АФ и ПФ на дискретных элементах – это компромиссное решение для силовой электроники. Известно, что АФ плохо справляются с резкими переходными процессами и помехами большой амплитуды, что ограничивает верхний частотный диапазон их применения. Для уменьшения частоты среза в ПФ на дискретных элементах рекомендуется выбирать большие номиналы компонентов, что приводит к повышению массогабаритных характеристик таких устройств. Это в разы повышает стоимость готового изделия. Совместное использование АФ- и ПФ-фильтров позволяет компенсировать недостатки друг друга. Стоит отметить, что такие фильтры не оказывают должного ослабления на низких и высоких частотах.

Гибрид фильтра на поверхностных акустических волнах и LC-резонатора

В частотно-избирательных цепях современных радиоприемных устройств актуально использование фильтров с широким диапазоном перестройки. Для обеспечения этих требований в преселекторах радиоприемных устройств, широкодиапазонных и многоканальных приемниках, системах радиомониторинга применяют гибридные фильтры, состоящие из ПАВ-фильтра и LC-резонатора.

В [34] предложено звено гибридного лестничного ПАВ- и LC-фильтра, состоящее из ПАВ-резонатора в последовательной ветви и LC-контура в параллельной ветви. Схема такого фильтра показана на рис. 7. За счет изменения отношения статической емкости ПАВ-резонатора и емкости LC-контура в параллельной ветви гибрида возможно изменять уровень вносимых потерь, подавление в полосе заграждения и ширину полосы пропускания фильтра. Такой гибрид, настроенный на центральную частоту 326 МГц, обладает вносимыми потерями в полосе частот, равными 1,3 дБ, и ослаблением в полосе заграждения – 6 дБ.

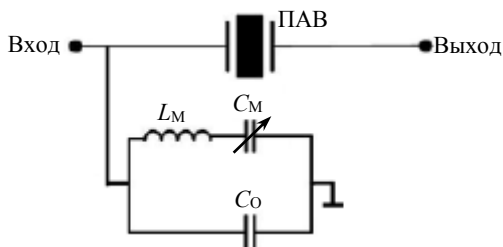


Рис. 7. Схема гибридного лестничного фильтра, состоящего из ПАВ-резонатора и LC-резонатора [34]

В [35] предложен гибрид, состоящий из перестраиваемого LC-контура в последовательной ветви и ПАВ-резонаторов в параллельных ветвях. Схема такого фильтра показана на рис. 8.

За счет изменения емкости LC-контура в последовательной ветви гибрида достигается изменение

центральной частоты фильтра. Этот гибридный фильтр с малыми вносимыми потерями в полосе пропускания (1–2 дБ) обладает широким диапазоном перестройки (64 МГц), который достигается за счет изменения емкости C_M , при этом он имеет небольшой уровень ослабления в полосе заграждения.

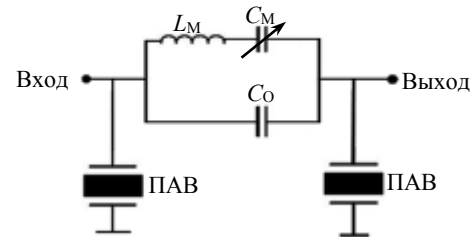


Рис. 8. Схема перестраиваемого гибрида с расположением ПАВ-фильтров в параллельных ветвях [35]

Таким образом, гибрид ПАВ-фильтра и LC-контура – это компактный фильтр с АЧХ полосно-пропускающего фильтра (ППФ). Он обладает малыми вносимыми потерями в полосе пропускания и широким диапазоном перестройки. Эти фильтры характеризуются небольшим ослаблением в полосе заграждения. Проблема низкой избирательности легко решается каскадированием звеньев. Совместно либо взамен каскадирования возможно использование парного размещения резонаторов в звеньях, что позволяет увеличить уровень внеполосного подавления. Однако стоит обратить внимание, что при этом сужается полоса пропускания фильтра.

Гибрид модального фильтра и защитной меандровой линии

Отдельным направлением гибридизации фильтров являются гибриды новых устройств, функционирующих по технологии модальной фильтрации, которые активно исследуются в ТУСУРе. Такие устройства называются МФ и защитная МЛ, в [36] приведено качественное сравнение их возможностей. Принцип их работы заключается в разложении во временной области помехового СКИ большой амплитуды на импульсы меньшей амплитуды из-за разности задержек мод, распространяющихся в линии. Эффект разложения СКИ достигается в структурах с неоднородным диэлектрическим заполнением, что позволяет получить разные скорости распространения для каждой моды при постоянстве поперечного сечения. Так, МЛ не подразумевает использование резисторов, обладает вдвое большими задержками при прочих равных с МФ условиях. МЛ способна раскладывать СКИ даже в однородном диэлектрике за счет импульса перекрестной наводки. МЛ с воздушным заполнением имеет единичный коэффициент передачи на всех частотах. В МФ необходимо наличие пассивных проводников, и он обладает большей частотой среза, чем МЛ с неоднородным диэлектриком. При этом в МЛ вход и выход не разнесены в пространстве, поэтому при определенных условиях помеха может миновать устройство защиты. Гибридное соединение МФ и МЛ позволяет добиться улучшенных защитных характери-

стик, а именно может увеличить ослабление СКИ (за счет разложения в МЛ каждого импульса с выхода МФ), при сравнительно небольшом увеличении массогабаритных показателей конечного устройства.

В [37] проводится апробация возможности разложения СКИ в гибриде 3-проводного МФ и 2-проводной МЛ, при этом достигается ослабление в 9,8 раза. В работе [38], где представлен гибрид 5-проводного микрополоскового МФ и витка 2-проводной МЛ с торцевой связью, достигнуто большее ослабление за счет изменения количества проводников и параметров поперечных сечений. Поперечные сечения и схема электрических соединений приведены на рис. 9 и 10.

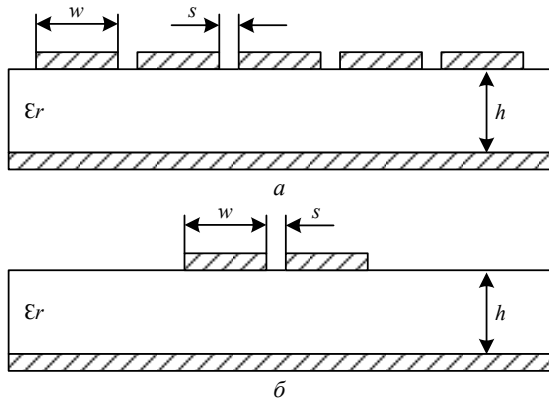


Рис. 9. Поперечные сечения 5-проводного МФ (а) и 2-проводной МЛ с торцевой связью (б) [37]

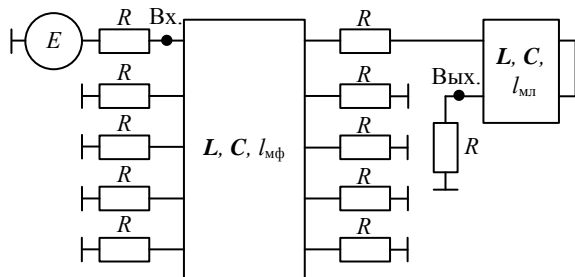


Рис. 10. Схема электрических соединений 5-проводного МФ и 2-проводной МЛ с торцевой связью [37]

В результате модального разложения СКИ на выходе гибридного устройства, состоящего из МФ (рис. 9, а) и МЛ (рис. 9, б), на импульсы меньшей амплитуды, коэффициент ослабления СКИ составил 26,6 раза относительно половины ЭДС.

Также известно исследование [39], где рассматривается разложение СКИ в гибриде, состоящего из 4-проводного МФ и витка 2-проводной МЛ с лицевой связью. Поперечные сечения и схема электрических соединений 4-проводного МФ и МЛ с лицевой связью приведены на рис. 11 и 12 соответственно.

При использовании такого гибрида коэффициент ослабления СКИ (относительно половины ЭДС) в структуре с 4-проводным МФ составил 11,92 раза.

Таким образом, гибрид МФ и МЛ является структурой, состоящей из проводников, расположенных в неоднородном диэлектрическом заполнении, которая обладает формой АЧХ ФНЧ и способна

осуществлять модальную фильтрацию. Такой гибрид обладает широкой полосой частот до десятков и сотен МГц.

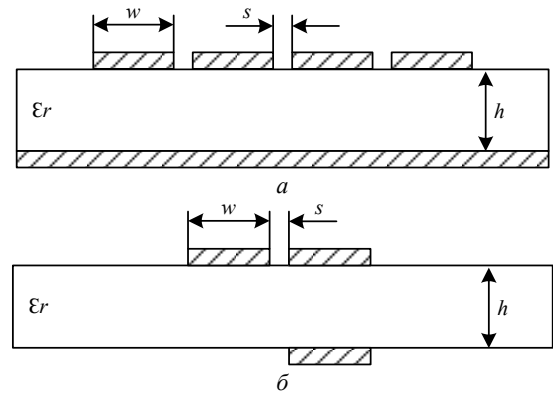


Рис. 11. Поперечные сечения 4-проводного МФ (а) и 2-проводной МЛ с лицевой связью (б) [39]

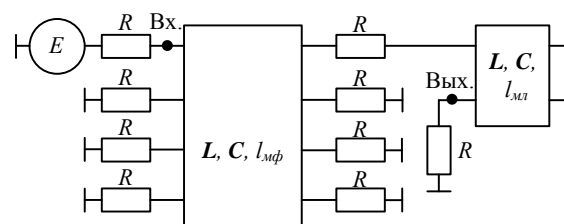


Рис. 12. Схема электрических соединений 4-проводного МФ и 2-проводной МЛ с лицевой связью [39]

Слабые избирательные свойства гибрида легко компенсируются за счет каскадирования или использования материалов с большими значениями диэлектрической проницаемости. Такие гибриды могут быть интегрированы в ПП электронного устройства и могут функционировать даже в сложных условиях эксплуатации. Из-за своих конструктивных особенностей в таком фильтре вероятность поломки сводится к минимуму.

Гибрид модального фильтра и пассивного фильтра на дискретных элементах

В системах питания современных РЭС присутствуют помехи как низкой, так и высокой частоты. ПФ на дискретных компонентах, спроектированные на небольшую частоту среза АЧХ, наиболее часто применяются в таких системах. Однако они обладают паразитными параметрами, вследствие чего не способны обеспечивать требуемое ослабление при воздействии СКИ. МФ эффективно подавляют СКИ, но обладают широкой полосой пропускания. Для обеспечения эффективного подавления кондуктивных помех, включая СКИ, применяют гибридные фильтры, состоящие из ПФ на дискретных элементах, в частности, LC-фильтра, и МФ. Совместное использование МФ и LC-фильтров позволяет получить АЧХ необходимой формы и обеспечить требуемое ослабление СКИ. Данное устройство применяется для защиты цепей питания, а также радиочастотных цепей РЭС, восприимчивых к импульсным помехам.

Показана возможность гибридного включения фильтра электромагнитных помех (ЭМП) на LC-

компонентах и МФ. Электрическая принципиальная схема такого гибрида показана на рис. 13, а на рис. 14 показано поперечное сечение МФ. В данном гибриде к одному из полюсов фильтра ЭМП подключен МФ, при этом способность ослаблять помеху рассматривается в синфазном и дифференциальном режимах. В МФ помеха в одном из полюсов питания раскладывается на последовательность импульсов при условии, если ее длительность незначительно больше разности задержек мод. В синфазном режиме на помеху оказывают влияние синфазные конденсаторы и синфазный дроссель. В дифференциальном режиме на помеху влияют лишь конденсаторы.

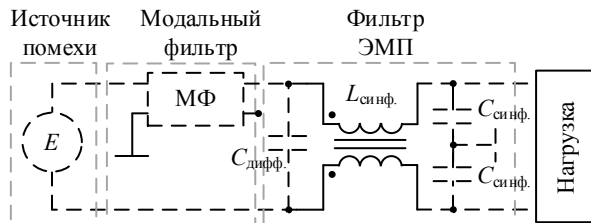


Рис. 13. Схема электрическая принципиальная гибрида МФ и ПФ

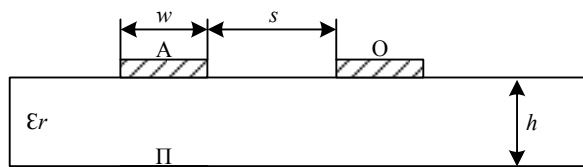


Рис. 14. Поперечное сечение МФ

При прохождении только фильтра ЭМП СКИ длительностью 1 нс ослабляется в 2,65 раза, а при прохождении через гибриды, состоящий из фильтра ЭМП и МФ, – в 8,18 раза.

В [40] выполнено исследование, где в качестве гибрида рассматривается соединение фильтра ЭМП, показанного на рис. 15, а, и двух отдельных МФ, представленных на рис. 15, б. Один МФ подключен в верхнее, а другой в нижнее плечо фильтра ЭМП, как показано на рис. 16. Помеха ослабляется в каждом из МФ при условии, если ее длительность незначительно больше разности задержек мод. Затем в синфазном режиме помеху ослабляет синфазный дроссель и LC-звенья фильтра. В дифференциальном режиме помеху ослабляют только LC-звенья фильтра. Комбинация звеньев изменяется в зависимости от режима помехи.

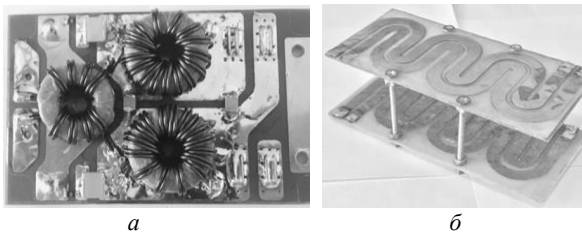


Рис. 15. Макеты МФ (а) и фильтра ЭМП (б) [41]

Частота среза такого гибрида составляет 8 кГц для дифференциального и 70 кГц для синфазного

режимов. При воздействии СКИ длительностью 700 пс (по уровню 0,5) амплитуда СКИ на выходе гибрида уменьшается в 84 раза в дифференциальном и 140 раз в синфазном режимах.

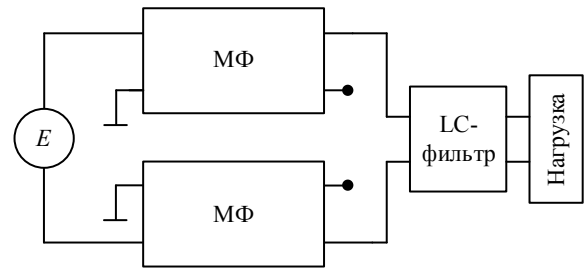


Рис. 16. Схема гибридного фильтра из фильтра ЭМП и двух МФ [41]

Представлено гибридное устройство защиты, состоящее из 4-проводного МФ, оптимизированного для ослабления СКИ в синфазном, дифференциальном режимах, и LC-фильтра. Поперечное сечение МФ приведено на рис. 17, а электрическая принципиальная схема гибрида – на рис. 18. Помеха независимо от режима, распространяясь вдоль МФ, раскладывается на последовательность импульсов меньшей амплитуды, если ее длительность меньше разности задержек мод. Затем в синфазном режиме токи, протекающие через обмотки синфазного дросселя, индуцируют магнитные потоки одной направленности, в результате чего растет индуктивное сопротивление синфазного дросселя, а в дифференциальном режиме эти токи компенсируют друг друга, не приводя к насыщению магнитопровода. Также на помеху в обоих режимах воздействуют LC-звенья фильтра, образуемые катушками индуктивности и конденсаторами.

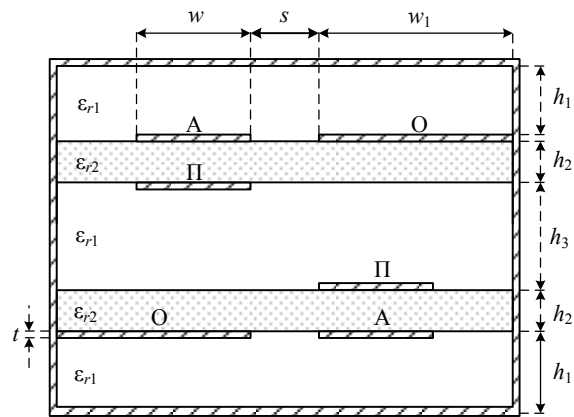


Рис. 17. Поперечное сечение 4-проводного МФ

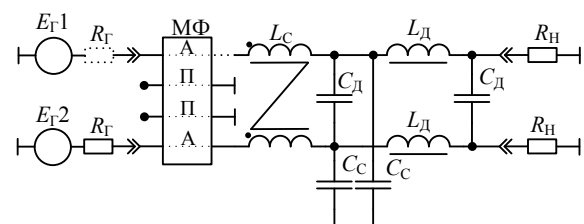


Рис. 18. Электрическая принципиальная схема гибридного устройства защиты

Частота среза АЧХ такого гибрида составляет 15 кГц для дифференциального и 12 кГц для синфазного режимов. При воздействии СКИ (ЭДС 1 В) максимальное напряжение помехи на выходе гибрида составляет 30 мВ для дифференциального и 23 мВ – для синфазного режимов. Вносимые потери равны –24,4 и –26,7 дБ для дифференциального и синфазного режимов соответственно [41].

Таким образом, гибрид МФ и LC-фильтра является пассивным фильтром с частотной избирательностью, которая, в основном, определяется LC-фильтром, и способен осуществлять модальную фильтрацию. Такой фильтр обычно имеет полосу пропускания до единиц и десятков кГц. За счет применения МФ в составе гибрида удается скомпенсировать АЧХ выше частоты среза LC-фильтра, тем самым увеличив ослабление высокочастотных помех. Гибрид обладает небольшими размерами, а отсутствие полупроводниковых приборов в его составе значительно повышает надежность. Эти свойства

позволяют использовать такой фильтр в критичных областях с высокими требованиями к электрическим характеристикам и надежности фильтра.

Сравнительный анализ гибридных фильтров

Использование устройств с различными принципами работы позволяет существенно расширить возможности защиты от кондуктивных помех. Так гибридные фильтры являются усовершенствованными устройствами защиты, свойства которых позволяют использовать их в широком диапазоне областей применения. Их можно сгруппировать по следующим признакам: область применения, тип частотной характеристики, уровень внеполосного ослабления, диапазон рабочих частот, максимально допустимый уровень помехи, надежность, стоимость готового изделия, сложность проектирования и трудность его интеграции в готовое оборудование. Для наглядного сравнения возможностей гибридных фильтров результаты обзора сведены в таблицу.

Сравнение гибридных фильтров

Параметр/тип гибрида	АФ и ПФ	ПАВ и LC	МФ и МЛ	МФ и LC
Область применения	Цепи питания РЭС	Радиочастотные цепи	Радиочастотные и цепи питания РЭС	Цепи питания РЭС и низкочастотные интерфейсы
Тип частотной характеристики	ФНЧ*	ППФ	ФНЧ	ФНЧ
Уровень внеполосного ослабления	От десятков до сотни дБ	От единиц до десятков дБ	От единиц до десятков дБ	От десятков до сотни дБ
Полоса пропускания фильтра	От десятков кГц до десятков МГц	От десятков до сотен МГц	От десятков до сотен МГц	От единиц до десятков кГц
Допустимый уровень помех**	Средний	Средний	Высокий	Высокий
Надежность	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Стоимость изделия	Высокая	Средняя	Низкая	Средняя
Сложность проектирования	Средняя	Средняя	Низкая	Низкая
Сложность интеграции в РЭС	Средняя	Низкая	Низкая	Средняя

* Не оказывают должного ослабления на низких частотах из-за способа детектирования помехи.

**Уровень помех при котором фильтр сохраняет свою работоспособность

Из таблицы видно, что большинство гибридных фильтров подходят для использования в цепях питания РЭС. Между тем использование гибридов на основе ПАВ-фильтра и LC-контура в цепях питания нецелесообразно из-за его АЧХ ППФ, а использование в радиочастотных цепях ограничено полосой полезного сигнала, который может пройти через фильтр без искажений.

По типу частотной характеристики все представленные гибриды являются ФНЧ, кроме гибридного соединения ПАВ-фильтра и LC-контура, который является ППФ. Также стоит обратить внимание, что гибриды АФ и ПФ лишь незначительно ослабляют помеху, чья частота не превышает единицы герц. Эта особенность обусловлена способом детектирования помехи и может быть устранена, если сенсор АФ будет гальванически соединен с источником помех.

По уровню внеполосного ослабления наибольшим ослаблением обладают гибриды МФ и LC-фильтра, а также АФ и ПФ. Гибриды МФ и МЛ и ПАВ-фильтра и LC-фильтра обладают меньшим ослаблением, однако существует возможность увеличения ослабления за счет каскадирования звеньев и использования материалов с большей диэлектрической проницаемостью в случае с МФ и МЛ.

По полосе пропускания фильтра стоит выделить гибриды МФ и LC-фильтра и АФ и ПФ. Они обладают наименьшими значениями частоты среза. Гибриды МФ и МЛ и ПАВ-фильтра и LC-фильтра обладают более широкой полосой.

По допустимому уровню помех гибриды МФ и МЛ и МФ и LC-фильтра наиболее предпочтительны, так как они могут продолжить нормально функционировать после воздействия в несколько тысяч вольт. В гибриде ПАВ-фильтра и LC-фильтра ограничивающим фактором является расстояние между

проводниками на подложке пьезокристалла, а в гибриде АФ и ПФ – напряжением работы активного элемента фильтра.

По надежности наименее надежным считается гибрид АФ и ПФ. Из-за наличия активных компонентов он не способен выдерживать длительные перегрузки, изменение температуры и воздействие радиации. Гибриды МФ и LC-фильтра и МФ и МЛ из-за простоты конструкции способны работать в самых жестких условиях эксплуатации.

Гибрид МФ и МЛ производится в рамках технологического процесса производства ПП, из-за чего обладает наименьшей стоимостью. В гибриде МФ и LC-фильтра добавляется стоимость компонентов LC-фильтра. В гибриде ПАВ-фильтра и LC-фильтра стоимость определяет материал пьезокристалла и сложность топологии ПАВ-фильтра, а в гибриде АФ и ПФ – номенклатура используемых компонентов.

По сложности проектирования самым сложным является гибрид АФ и ПФ, затем гибрид ПАВ-фильтра и LC-фильтра. Гибриды МФ и LC-фильтра, а также МФ+МЛ являются менее сложными в проектировании, чем перечисленные гибриды.

По сложности интеграции в существующую РЭС гибриды ПАВ-фильтра и LC-фильтра и МФ и МЛ наиболее предпочтительны, потому что первый не занимает много места, а второй может быть интегрирован в ПП существующего устройства. Для гибрида МФ и LC-фильтра необходимо выделение дополнительного пространства, а для гибрида АФ и ПФ – еще и размещение детекторов помех, что допускает внесение изменений в конструкцию уже существующего устройства.

Заключение

Таким образом, выполнен обзор современного состояния исследований в области гибридных фильтров, защищающих от кондуктивных помех. Приведены схемы, кратко описан принцип их работы и определена область применения. Проведен сравнительный анализ каждого из устройств с обсуждением их достоинств и недостатков. Материал может быть полезен при проектировании РЭС и помочь в организации эффективной защиты от кондуктивных помех.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001.

Литература

- ГОСТ Р 51318.11–2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Промышленные, научные, медицинские и бытовые (ПНМБ) высокочастотные устройства. Радиопомехи индустриальные. Нормы и методы измерений. – М.: Стандартинформ, 2007. – 39 с.
- Воздействие высокоэнергетичных космических протонов и ионов на элементы бортовой аппаратуры космических аппаратов / Н.Г. Чеченин, А.Г. Кадменский, Х.А. Мотавех, М.И. Панасюк // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 4. – С. 17–29.
- ГОСТ Р 50628–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость машин электронных вычислительных персональных к электромаг-

нитным помехам. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2001. – 11 с.

- ГОСТ Р 51317.4.1–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Испытания на помехоустойчивость. Виды испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 16 с.

- Loborev V.M. The modern research problems. Plenary lecture // Proc. of AMEREM Conference. – Albuquerque, USA, 1996. – P. 121–127.

- Tihanyi L. EMC in power electronics. – N.J.: IEEE Press, 1995. – 415 p.

- ГОСТ РВ 6601-001–2008. Оборудование бортовое авиационное. Общие требования к восприимчивости при воздействии электромагнитных помех и методики измерения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 49 с.

- Шостак А. Реверберационная камера для испытаний на восприимчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Проблемы использования // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2021. – № 4. – С. 130–135.

- Mazzola S. MIL-STD-461: The basic military EMC specification and it's evolution over the years // 2009 IEEE long island systems, applications and technology conference. – Farmingdale, NY, USA, 2009. – P. 1–5.

- Фоминич Э.Н. Электромагнитный терроризм. Новая угроза для информационно-управляющих систем / Э.Н. Фоминич, Д.Р. Владимиров // Военный инженер. – 2016. – № 2. – С. 10–17.

- Сидоров А.В. Электромагнитный терроризм как источник угроз инфокоммуникационным системам связи и управления / А.В. Сидоров, О.И. Бокова, Н.С. Хохлов // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2014. – № 13. – С. 106–109.

- Song W. Transfer function measurement for automotive intentional electromagnetic interference / W. Song, Y. Zhong, C. Kim, C. Park, C. Hwang // 2020 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility & signal/power integrity (EMCSI). – Reno, NV, USA, 2020. – P. 276–281.

- Hamamah F. Concerns on the risk of Malaysian civil and defense systems due to intentional electromagnetic interference / F. Hamamah, W.W. Ahmad, C. Gomes, M.M. Isa, M.J. Homam // 2019 IEEE Asia-Pacific conference on applied electromagnetics (APACE). – Melacca, Malaysia, 2019. – P. 1–6.

- Dawson J.F. Intentional electromagnetic interference effects in cyber-physical systems // Proceedings of EMC UK 2015. – UK, 2015. – P. 1–6.

- Kumar V. Intentional electromagnetic interference and science of protection mechanism / V. Kumar, K.K. Jha // 8th International conference on electromagnetic interference and compatibility. – Chennai, India, 2003. – P. 155–158.

- Nishiyama H. Fundamental study on influence of intentional electromagnetic interference on IC communication / H. Nishiyama, T. Okamoto, Y. Kim, D. Fujimoto, Y.I. Hayashi // 2019 12th International workshop on the electromagnetic compatibility of integrated circuits (EMC Compo). – Hangzhou, China, 2019. – P. 201–203.

- ГОСТ Р 51317.1.5–2009. Совместимость технических средств электромагнитная. Воздействия электромагнитные большой мощности на системы гражданского назначения. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 40 с.

- Фоминич Э.Н. Электромагнитный терроризм / Э.Н. Фоминич, Д.Р. Владимиров, В.Н. Парахин // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2013. – № 1-2 (55-56). – С. 112–116.

19. Mora N. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – 2014. – No. 41. – 92 p.
20. EN 55022 CISPR 22 Information Technology Equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. – United Kingdom, London: British Standards Institution. – 2006. – 10 p.
21. Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – 254 с.
22. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
23. Gazizov A.T. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures / A.T. Gazizov, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 1136–1142.
24. Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью / А.В. Носов, Р.С. Суворцев, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 47–50.
25. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях / Е.С. Жечев, Е.Б. Черникова, А.О. Белосусов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2. – С. 162–179.
26. Костелецкий В.П. Разработка сильноточного модального фильтра с уменьшенной массой для силовой шины электропитания космического аппарата / В.П. Костелецкий, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Матер. докладов междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2020. – С. 294–296.
27. A multi-function common mode choke based on active CM EMI filters for AC/DC power converters / D. Liyu, C. Wenjie, Y. Xu, Z. Minghua, Y. Yang, W. Rui // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 43534–43546.
28. Design of active EMI filters with the integrated passive component / L. Dai, W. Chen, Y. Yang, R. Wang, X. Yang // 2019 IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC). – Anaheim, CA, USA, 2019. – P. 640–643.
29. Chen W. A novel hybrid common-mode EMI filter with active impedance multiplication / W. Chen, X. Yang, Z. Wang // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2010. – Vol. 58, No. 5. – P. 1826–1834.
30. Investigation of hybrid EMI filters for common-mode EMI suppression in a motor drive system / S. Wang, Y.Y. Maillat, F. Wang, D. Boroyevich and R. Burgos // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 25, No. 4. – P. 1034–1045.
31. Ali M. Integrated hybrid EMI filter: Study and realization of the active part / M. Ali, E. Labouré, F. Costa // 2013 15th European conference on power electronics and applications (EPE). – Lille, France, 2013. – P. 1–8.
32. A hybrid EMI filter with ultra-wide bandwidth / W.C. Ho, C.K. Lee, X. Liu, P.K.W. Chan, S.Y.R. Hui, Y.S. Lee // 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. – Austin, TX, USA, 2008. – P. 676–681.
33. Passive and active hybrid integrated EMI filters / J. Biela, A. Wirthmueller, R. Woespe, M.L. Heldwein, K. Raggl, J.W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, No. 5. – P. 1340–1349.
34. Веремеев И.В. Влияние параметров LC-резонатора на характеристики гибридного ПАВ+ LC лестничного фильтра // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2015. – № 2. – С. 21–25.
35. Веремеев И.В. Гибридный перестраиваемый лестничный фильтр на основе LC- и ПАВ-резонаторов // Матер. междунар. науч.-техн. конф. «Радиотехника, электроника и связь (РЭС–2015)». – Омск, 2015. – С. 413–418.
36. Газизов Т.Р. Сравнительный анализ двух видов новых устройств для защиты от электромагнитного терроризма // VII Регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», Томск, 15–30 ноября 2018. – С. 601–603.
37. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition / A.V. Nosov, A.O. Belousov, R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1353, No. 012022. – P. 1–6.
38. Сирица В.А. Разложение сверхкороткого импульса в каскадно соединенных 5-проводном микрополосковом модальном фильтре и витке меандровой микрополосковой линии / В.А. Сирица, Р.С. Суворцев, А.В. Носов // Матер. докладов междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2020. – С. 321–324.
39. Kim G. Ultrashort pulse decomposition in hybrid protection devices based on the cascade-connected modal filter and meander line with broad-side coupling / G. Kim, A. Nosov, R. Surovtsev // 2021 IEEE 22nd International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM). – Altai, Russia, 2021. – P. 163–166.
40. Хажибеков Р.Р. Многокаскадные модальные фильтры: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2019. – 202 с.
41. ГОСТ 13661–92. Совместимость технических средств электромагнитная. Пассивные помехоподавляющие фильтры и элементы. Методы измерения вносимого затухания. – М.: Стандартинформ, 1992. – 23 с.

Костелецкий Валерий Павлович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-1275-6406
Тел.: +7-952-163-49-93
Эл. почта: kosteletskiy.vp@gmail.com

Kosteletskii V.P.

Overview of hybrid filters for protection against conductive interference

Conductive interference can penetrate to electronic components of radio-electronic equipment (REE) through the conductors of signal and power circuits. To protect against conductive interference electrical filters are used. The main disadvantage of such a solution is that the electrical filter is a device designed for specific purposes and is often not suitable for related tasks. To ensure electromagnetic compatibility the joint use of electrical filters of different purposes is practiced, such a protection device is called a hybrid. The specific property of a hybrid is that the characteristics of the electrical filters used in its composition compensate for the disadvantages of each other. In this article a review and comparative analysis of hybrid interference filters is made, this review can be used in the design of REE and organization of effective protection from conducted interference.

Keywords: electromagnetic compatibility, protection devices, hybrid filter, ultrashort pulse, conductive interference, common mode, differential mode, modal filtration.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-37-47

References

1. State Standard 51318.11-2006. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Industrial, scientific, medical and domestic (ISMD) high-frequency equipment. Radio disturbance. Limits and methods of measurement. Moscow, Standartov Publ., 2007. 39 p. (in Russ.).
2. Chechenin N.G., Kadenskii A.G., Motawekh H., Panasyuk M.I. [Impact of high energy cosmic rays of protons and ions on elements of on]. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques (abbreviated title: J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2012, no. 4, pp. 17–29 (in Russ.).
3. State Standard 50628-2000. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity of personal computers to electromagnetic disturbances. Requirements and test methods. Moscow, Standartov Publ., 2001. 11 p. (in Russ.).
4. State Standard 51317.4.1-2000. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity tests. Overview of the test. Moscow, Standartov Publ., 2007. 11 p. (in Russ.).
5. Loborev V.M. The modern research problems. Plenary lecture. Proc. of AMEREM Conference, Albuquerque, 1996, pp. 121–127.
6. Tihanyi L. EMC in power electronics, N.J.: IEEE Press, 1995, 415 p.
7. State Standard 6601-001-2008 On-board aviation equipment. General requirements for susceptibility to electromagnetic interference and control methods. Moscow, Standartov Publ., 2009. 49 p. (in Russ.).
8. Shostak A. [Reverberation chamber for rf electromagnetic field susceptibility testing. Usage problems]. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2021, no. 4, pp. 130–135 (in Russ.).
9. Mazzola S. MIL-STD-461: The basic military EMC specification and its evolution over the years. *2009 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference*, Farmingdale, NY, USA, 2009, pp. 1–5.
10. Fominich E.N., Vladimirov D.R. [Electromagnetic terrorism. New threat to information and control systems]. *Military Engineer*, 2016, no. pp. 10–17 (in Russ.).
11. Sidorov A.V., Bokova O.I., Hohlov N.S. [Electromagnetic terrorism as a source of threats of infocommunication communication and control systems]. *Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia*, 2014, no. 13, pp. 106–109 (in Russ.).
12. Song W., Zhong Y., Kim C., Park C., Hwang C. Transfer function measurement for automotive intentional electromagnetic interference. *2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*, Reno, NV, USA, 2020, pp. 276–281.
13. Hamamah F., Ahmad W.W., Gomes C., Isa M.M., Homam M.J. Concerns on the risk of Malaysian civil and defense systems due to intentional electromagnetic interference. *2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Reno, NV, USA, 2019, pp. 1–6.
14. Dawson J.F. Intentional electromagnetic interference effects in cyber-physical systems. *Proceedings of EMC UK 2015*, UK, 2015, pp. 1–6.
15. Kumar V., Jha K.K. Intentional electromagnetic interference and science of protection mechanism. *8th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, Chennai, India, 2003, pp. 155–158.
16. Nishiyama H., Okamoto T., Kim Y., Fujimoto D., Hayashi Y.I. Fundamental study on influence of intentional electromagnetic interference on IC communication. *2019 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo)*, Hangzhou, China, 2019, pp. 201–203.
17. State Standard 51317.1.5-2009 Electromagnetic compatibility of technical equipment. High power electromagnetic influences on civil systems. Basic provisions. Moscow, Standartov Publ., 2009. 40 p. (in Russ.).
18. Fominich E.N., Vladimirov D.R., Parahin Y.N. [Electromagnetic terrorism]. *Military Engineer. Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism Engineering Devices. Issue 16*, 2013, no. 1–2(55-56), pp. 112–116 (in Russ.).
19. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources. *System Design and Assessment Notes*, 2014, no. 41, pp. 1–92.
20. EN 55022 CISPR 22 Information Technology Equipment - Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. United Kingdom, London: British Standards Institution, 2006, 10 p.
21. Gizatullin Z. M. *Pomekhoustojchivost' sredstv vychislitel'noj tekhniki vnutri zdaniy pri shirokopolosnyh elektromagnitnyh vozdeystviyah. Monografija* [The Immunity of Computer Equipment inside Buildings with Broadband Electromagnetic Effects. Monography]. Kazan, Kazan State Technical University Publ., 2012. 254 p. (in Russ.).
22. Kechiev L.N. *Proektirovanie pechatnyh plat dlya cifrovoj bystrodeystvuyushchej apparatury* [Designing printed circuit boards for digital high-speed equipment]. Moscow, «Gruppa IDT» LTD, 2007. 616 p. (in Russ.).
23. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1136–1142.
24. Nosov A.V., Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T. Experimental confirmation of possibility of the electronic equipment protection against an ultrashort pulse by means of its decomposition in the C-section with broad-side coupling. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 47–50 (in Russ.).
25. Zhechev Y.S., Chernikova E.B., Belousov A.O., Gazizov T.R. Experimental research of a reflection symmetric modal filter in the time and frequency domains. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 162–179 (in Russ.).
26. Kosteleckii V.P., Gazizov T.R., Zabolocky A.M. *Razra-botka sil'notochnogo modal'nogo fil'tra s umen'shennoj massoj dlya silovoj shiny elektropitaniya kosmicheskogo apparata* [Development of a high-current modal filter with reduced mass for the power bus of spacecraft power supply]. *Proceedings of International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems*. Tomsk, Russia, 2020, pp. 294–296 (in Russ.).
27. Dai L., Wenjie C., Xu Y., Minghua Z., Yang Y., Rui W. A multi-function common mode choke based on active CM EMI filters for AC/DC power converters. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 43534–43546.
28. Dai L., Chen W., Yang Y., Wang R. and Yang X. Design of active EMI filters with the integrated passive component. *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Anaheim, CA, USA, 2019, pp. 640–643.
29. Chen W., Yang X., Wang Z. A novel hybrid common-mode EMI filter with active impedance multiplication. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 1826–1834.

30. Wang S., Yoann Y.M., Fei W., Dushan B., Rolando B. Investigation of hybrid EMI filters for common-mode EMI suppression in a motor drive system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 1034–1045.
31. Ali M., Labouré E., Costa F. Integrated hybrid EMI filter: Study and realization of the active part. *2013 - 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France, 2013, pp. 1–8.
32. Ho W.C., Lee C.K., Liu X., Chan P.K.W., Hui S.Y.R., Lee Y.S. A hybrid EMI filter with ultra-wide bandwidth. *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Austin, TX, USA, 2008, pp. 676–681.
33. Biela J., Wirthmueller A., Waespe R., Heldwein M.L., Raggl K. and Kolar J.W. Passive and active hybrid integrated EMI filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, vol. 24, no. 5, pp. 1340–1349.
34. Veremeev I.V. *Vliyaniye parametrov LC-rezonatora na harakteristiki gibridnogo PAV+ LC lestnichnogo fil'tra* [Influence of LC-resonator parameters on the characteristics of a hybrid SAW+LC ladder filter]. *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii–v promyshlennost'* [Young Russia: Advanced Technologies in Industry], 2015, no. 2, pp. 21–25 (in Russ.).
35. Veremeyev I.V. Hybrid tunable ladder type filters with LC and saw resonators. *Proceedings of Radio Engineering, Electronics and Communications*. Omsk, Russia, 2015, pp. 413–418 (in Russ.).
36. Gazizov T.R. *Sravnitel'nyj analiz dvuh vidov novykh ustroystv dlya zashchity ot elektromagnitnogo terrorizma* [Comparative analysis of two types of new devices for protection against electromagnetic terrorism]. VII Regional'naya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Nauka i praktika: proektnaya deyatel'nost' – ot idei do vnedreniya» [VII Regional Scientific and Practical Conference «Science and Practice: Project Activities – from idea to implementation»]. Tomsk, Russia, 2018, pp. 601–603 (in Russ.).
37. Nosov A.V., Belousov A.O., Surovtsev R.S. and Gazizov T.R. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1353, no. 012022, pp. 1–6.
38. Siritsa V.A., Surovcev R.S., Nosov A.V. *Razlozhenie sverh-korotkogo impul'sa v kaskadno soedinennoy 5-provodnom mikropoloskovom modal'nom fil'tre i vitke meandrovoj mikropoloskovoj linii* [Decomposition of an ultrashort pulse in a cascade-connected five-conductor microstrip modal filter and a turn of a meander microstrip line]. *Proceedings of International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems*. Tomsk, Russia, 2020, pp. 321–324 (in Russ.).
39. Kim G., Nosov A., Surovtsev R. Ultrashort pulse decomposition in hybrid protection devices based on the cascade-connected modal filter and meander line with broad-side coupling. *2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Altai, Russia, 2021, pp. 163–166.
40. Khazhibekov R.R. *Mnogokaskadnye modalnye fil'try* [Multi-cascade modal filters]. Cand. diss. Tomsk, 2019, 202 p. (in Russ.).
41. State Standard 13661-92. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Passive filters and elements for interference suppression. Methods of inserted damping measuring. Moscow, Standartov Publ., 1992, 23 p. (in Russ.).

Valerii P. Kosteletskii

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems

and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0003-1275-6406

Phone: +7-952-163-49-93

Email: kosteletskiy.vp@gmail.com

УДК 541.135:621.382

В.Г. Божков, Т.П. Бекезина, В.А. Бурмирова

Диоды с барьером Шоттки на основе термостойких контактов Ir-GaAs и Pt/Ir-GaAs, созданных электрохимическим осаждением

Работа посвящена исследованию термической устойчивости контактов Ir-GaAs и Pt/Ir-GaAs, полученных электрохимическим осаждением с использованием технологии, разработанной авторами. Выбор металлизации обусловлен целым рядом причин, о которых сказано ниже. Одна из важнейших – повышенная термическая устойчивость контактов, которая делает их перспективными для силовых приборов полупроводниковой электроники в широком диапазоне частот. Исследовались прямые и обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) контактов в диапазоне диаметров от 500 до 5 мкм и их параметры: показатель идеальности ВАХ n , измеряемая и эффективная высоты барьера ϕ_{bm} и ϕ_{bi} , обратное напряжение. Показано, что защита иридия тонким слоем Pt повышает его термическую устойчивость. Необходимо отметить необычно более высокую термическую устойчивость контактов с малым диаметром.

Ключевые слова: арсенид галлия, иридий, электрохимическое осаждение, вольт-амперная характеристика, термическая стабильность, показатель идеальности, высота барьера.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-48-52

По целому ряду свойств иридий можно отнести к наиболее интересным материалам для полупроводниковой электроники, в частности, для диодов на основе контактов с барьером Шоттки. Достоинства этого металла в химической стойкости, тугоплавкости (температура плавления ~ 2447 К), однородности и мелкозернистости структуры. Иридий имеет весьма близкие с GaAs значения коэффициентов теплового расширения (α): $6,66 \times 10^{-6}$ и $6,86 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ соответственно (для сравнения α (Pt) = $9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, α (Ta) = $5,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Это может положительно влиять на уровень механических напряжений в структуре Ir-GaAs и плотность дефектов, образующихся при термических отжигах. Известно, что контакт Ir-GaAs имеет максимальную для исследованных металлов платиновой группы энергию активации взаимодействия в системе металл-GaAs (M-GaAs): $\sim 3,15$ эВ [1]. Процесс взаимодействия проходит в основном в диапазоне температур 500–650 °С (начало – 400 °С), когда формируются фазы IrGa и IrAs₂ [1]. Благодаря мелкозернистой структуре (размер зерна 10–20 нм) в контакте Ir-GaAs формируется наиболее однородная (для полублагородных металлов) слоистая структура GaAs/IrAs₂/IrGa/Ir [1–3]. В работе [4] показано, что контакты Ir-GaAs с барьером Шоттки, полученные электронно-лучевым напылением, сохраняют хорошие параметры при быстром отжиге (10 с), по крайней мере, до 800 °С, а использование сплава Ir-Al позволяет поднять эту температуру до 950 °С.

Вместе с тем, высокая температура плавления может создать проблемы для нанесения металла на полупроводник. Во многих случаях эту проблему можно решить использованием электрохимического осаждения металла. Первые попытки создания электрохимических контактов Ir к n-GaAs были предприняты В.А. Батенковым с сотрудниками [5–7]. Однако использованные авторами электролиты характеризуются быстрым старением, либо большой трудоемкостью получения и относительно невысо-

ким качеством контактов. Существенный шаг в получении качественных электрохимических контактов Ir-GaAs был сделан разработкой электролита для осаждения Ir на GaAs, защищённого патентом [8]. Детальное исследование характеристик контактов Ir-GaAs, полученных с его использованием, подтвердило их высокое качество [9]: показатель идеальности вольт-амперной характеристики (ВАХ) $n < 1,1$ для контактов с диаметрами от 500 до 5 мкм; эффективная высота барьера $\phi_b \sim 0,9$ В практически совпадает с высотой барьера напыленных контактов; пробивное напряжение близко к теоретическому значению. В предлагаемой работе исследуется термическая устойчивость контактов Ir-GaAs, а также контактов с двухслойной металлизацией Pt/Ir-GaAs при кратковременных (10 мин в атмосфере водорода) воздействиях температуры.

Получение контактов и методы исследования

Контакты создавались на структурах n-n[±]GaAs, с толщиной эпитаксиального слоя 0,7 мкм и неоднородным распределением примеси: концентрация в приповерхностном слое толщиной 0,2 мкм – $8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в остальной области – $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Осаждение Ir проводилось в окна в диэлектрике (SiO₂), нанесённом пиролитическим окислением моносилана при температуре 360 °С. Толщина оксида 0,5 мкм. Обработка поверхности в окнах непосредственно перед осаждением металла включала обезжиривание, удаление собственного оксида в аммиачном растворе и промывку в деионизованной воде. Толщина осадка контролировалась временем осаждения и могла изменяться в диапазоне 50–250 нм. Используемые в экспериментах слои Ir и Pt не превышают обычно 100 нм. Диапазон диаметров контакта (D) – от 5 до 500 мкм.

Используемый электролит содержит сульфатные комплексы иридия неуставленной структуры, образующиеся в водном растворе, содержащем (г/л): гексахлоридиевую кислоту (в пере-

счете на иридий 3–6,5), сульфаминовую кислоту (30–60), при термообработке раствора на водяной бане при температуре 100 °С в течение 3–4 ч до перехода исходной красно-коричневой окраски раствора в устойчивую оранжево-желтую. На основании данных спектрофотометрии и инфракрасной спектроскопии можно заключить, что в электролите содержатся преимущественно биядерные сульфаматные комплексы иридия, в которых один ион иридия имеет степень окисления +3, а другой +4. Из полученного таким образом электролита проводилось осаждение иридия на арсенид галлия. Оптимальный режим осаждения, позволяющий получить качественное покрытие, соответствует температуре электролита 20–65 °С, катодной плотности тока от 0,1 до 2 А/дм² (предпочтительно от 0,3 до 0,5 А/дм²) без перемешивания; значение рН электролита в диапазоне от 0,5 до 0,8. Выход иридия по току при плотности тока 0,3 А/дм² в зависимости от температуры составляет (14–96)%.

Учитывая зависимость параметров ВАХ n , Φ_{bm} , Φ_b от смещения (тока), их измерения для контактов различного диаметра проводились в узком диапазоне токов (10^{-6} – 10^{-5}) А. Используемые в расчёте константы: постоянная Ричардсона $R^* = 8,16 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \text{ К}^{-2}$, относительная диэлектрическая проницаемость GaAs – $\epsilon_{s0} = 13,1$. Измерения ВАХ проводились на анализаторе полупроводниковых приборов Agilent B1500. Параметры ВАХ определялись из их анализа на основе модели контакта с барьером Шоттки с нелинейной зависимостью высоты барьера от смещения [10].

Последовательный анализ показывает, что точное выражение для ВАХ в прямом направлении для каждого тока и смещения может быть представлено через определяемые из ВАХ параметры: высота барьера Φ_{bn} и показатель идеальности n при этом токе [10]

$$I = AR^*T \exp\left(\frac{q\Phi_{bn}}{nkT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right). \quad (1)$$

Здесь A – площадь контакта; I и V – ток и напряжение; q – заряд электрона; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана. Достоинство величины $\Phi_{bn} = n\Phi_{bm}$, имеющей смысл некоторой условной высоты барьера, в возможности простого представления ВАХ контакта (1) и одновременно в довольно простой связи Φ_{bn} с эффективной (Φ_{bl}) и измеряемой высотой барьера:

$$\Phi_{bn} = n\Phi_{bm} = \Phi_{bl} + (n-1) \frac{kT}{q} \ln \frac{AR^*T^2}{I}, \quad (2)$$

Измеряемая высота барьера Φ_{bm} определяется непосредственно из ВАХ по току насыщения I_s при заданном прямом токе (обычно $\bar{I} = 10^{-6}$ А), n – показатель идеальности, измеренный при том же токе:

$$\Phi_{bm} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AR^*T^2}{I_s} \right), \quad (3)$$

$$n = \left(\frac{q}{kT} \frac{dV}{d \ln I} \right)_{V=\bar{V}, I=\bar{I}}. \quad (4)$$

Эти соотношения позволяют, согласно (2), определить эффективную (наиболее близкую к реальной [10]) высоту барьера Φ_{bl} , которая соответствует току \bar{I} . Как следует из (2), при $n = 1$ (т.е. для идеального контакта) выполняется равенство $\Phi_{bl} = \Phi_{bn} = \Phi_{bm}$ (иногда для Φ_{bl} используется обозначение $\Phi_b \equiv \Phi_{bl}$). Появление трёх высот барьеров при описании ВАХ реального контакта связано с нелинейной зависимостью высоты барьера от смещения [10], которая, несмотря на кажущуюся малость, оказывает очень сильное влияние на определяемые параметры. В пренебрежении нелинейностью высоты барьера и одновременно при $n > 1$ (т.е. при $n = \text{const}$) выражение (2) приобретает известный из литературы вид [11]

$$\Phi_b = n\Phi_{b0} - (n-1)\Phi_s, \quad (5)$$

где $q\Phi_s$ – положение уровня Ферми относительно зоны проводимости, Φ_{b0} – высота барьера при нулевом смещении на контакте.

Результаты исследований

На рис. 1, *a* и *б* представлены образцы ВАХ-контактов Ir-GaAs и Pt/Ir-GaAs соответственно. Характеристики отличаются достаточно высоким совершенством: показатель идеальности $< 1,1$ для всех диаметров контактов, хотя для самых малых диаметров значения n несколько увеличиваются. Для больших диаметров контактов замечен рост последовательного сопротивления (при больших токах), который согласно [9], связан с достаточно малой толщиной металлизации (эффект растекания при измерении с использованием точечного зонда) и практически не замечен для малых контактов (с малой длиной растекания) и контактов с дополнительным слоем Pt.

Зависимости измеряемых параметров ВАХ Φ_{bm} и n от температуры отжига при различных диаметрах контактов в диапазоне температур отжига от 300 до 500–550 °С (рис. 2, *a* и *б*), свидетельствуют, что деградация характеристик ярче проявляется в контактах большого диаметра. Для контактов Ir-GaAs после отжига при 500 °С на достаточно высоком уровне ($n < 1,2$) сохраняются параметры только у контактов с диаметрами 5 и 15 мкм. Наглядно это продемонстрировано на рис. 3, *a*. Деградация характеристик проявляется в росте избыточного тока, связанного, вероятно, с ростом плотности дефектов, генерируемых межфазным взаимодействием. Ток растёт с ростом площади контакта. Исключение для $D = 100$ мкм свидетельствует, что наблюдаемая деградация, вероятно, обусловлена воздействием факторов, которые при дальнейшем совершенствовании технологии могут быть устранены.

В деградации характеристик при 500 °С важную роль, возможно, играет недостаточно однородное осаждение Ir: утолщение осадка к периферии

контакта. В контактах большой площади оно выражено особенно сильно, тогда как в контактах малой площади не столь значительно [9]. Утолщение металла по периферии контакта способствует росту в этой области упругих механических напряжений, их релаксации (пластической деформации) и ускорен-

ному межфазному взаимодействию при отжиге. Последнее на начальной стадии может носить характер взаимной диффузии по «слабым» (дефектным) местам, т.е. характер нарушений, влияющих на ВАХ. Контакты с диаметром 5 мкм, судя по всему, подвержены этому в меньшей степени.

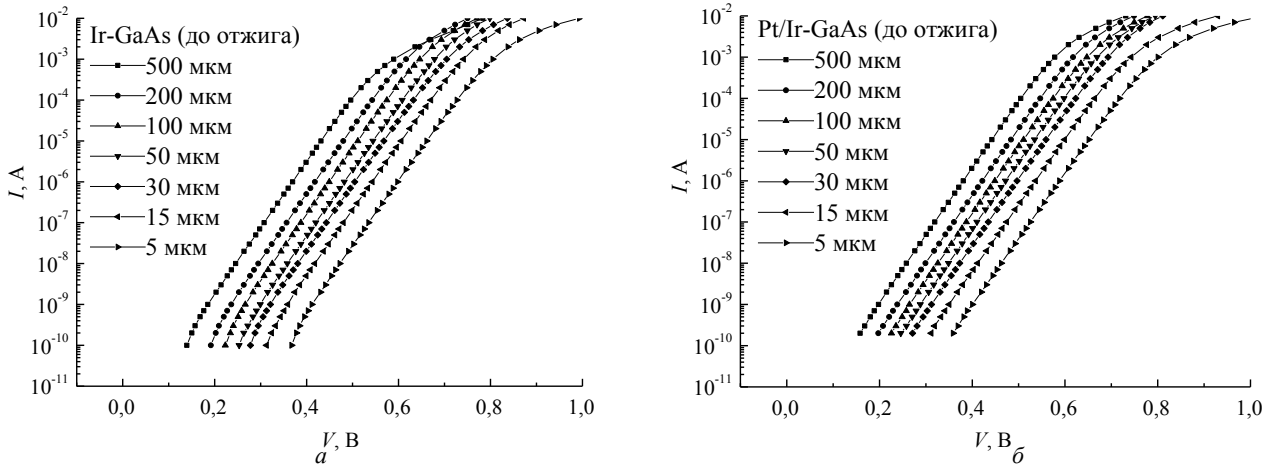


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики контактов различного диаметра при комнатной температуре: *a* – Ir-GaAs; *б* – Pt/Ir-GaAs

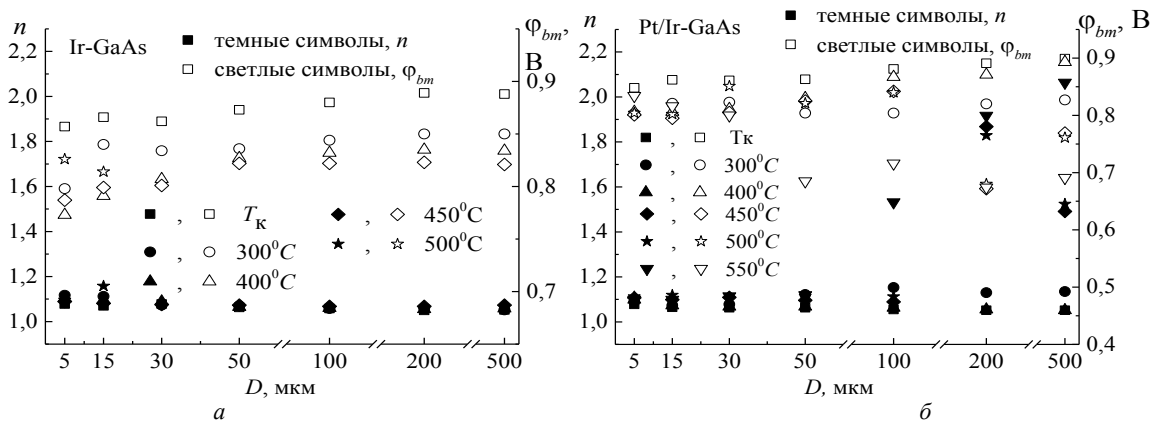


Рис. 2. Зависимость параметров ВАХ показателя идеальности и высоты барьера от температуры отжига для контактов различного диаметра: *a* – Ir-GaAs; *б* – Pt/Ir-GaAs

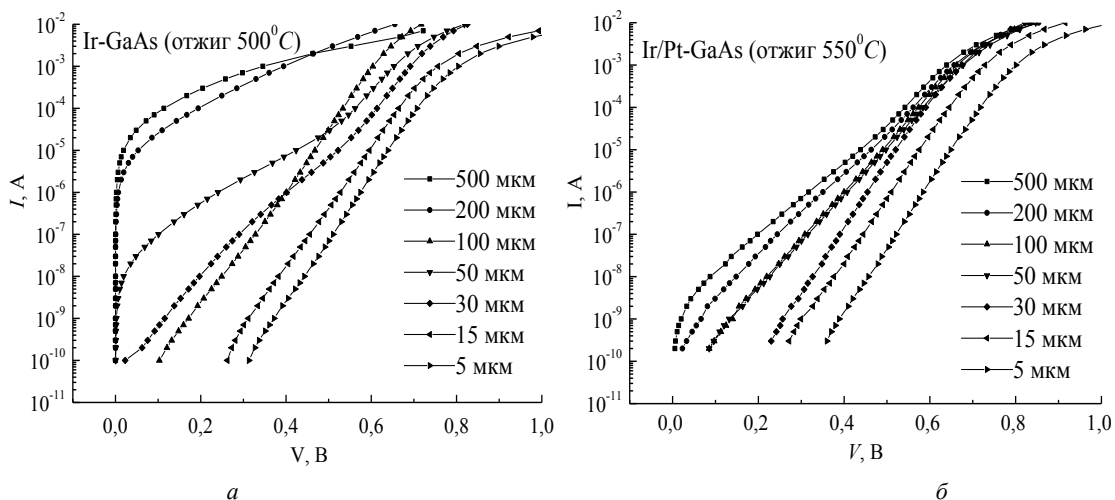


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики контактов различного диаметра при температуре отжига 500 и 550 °С соответственно: *a* – Ir-GaAs; *б* – Pt/Ir-GaAs

Что касается зависимости от отжига высоты барьера ϕ_{bm} , то нетрудно убедиться, что она падает по мере роста температуры. Наиболее заметное уменьшение при 300 °С связано, вероятно, с изменением структуры промежуточного оксидного слоя в контакте, которое сопровождается изменением его зарядового состояния, влияющего на высоту барьера.

Дальнейшее изменение ϕ_{bm} более вероятно связано с началом и продолжением межфазного взаимодействия, протекающего при этих температурах (см. выше). На рисунке не показаны значения эффективной высоты барьера ϕ_{bl} , которые при несколько большей величине изменяются примерно также, учитывая связь между ϕ_{bm} и ϕ_{bl} согласно (2).

Контакты Pt/Ir-GaAs отличаются большей термической устойчивостью в сравнении с контактами Ir-GaAs, примерно на 50–100 °С (см. рис. 2, б и 3, б). На последнем рисунке показаны ВАХ различных контактов при отжиге 550 °С. Хотя характер искажений ВАХ принципиально остается таким же, как для контактов с Ir (рост избыточного тока с ростом диаметра контакта), однако выражены они даже при отжиге 550 °С не столь ярко. Из ВАХ можно оценить значение показателя идеальности и для контактов с большими диаметрами (см. рис. 2, б). Такое поведение может означать, что наличие покрытия из слоя Pt сдерживает все межфазные процессы, которые ведут к деградации контактов. Из литературы известно, что металлы с малой толщиной более интенсивно взаимодействуют с полупроводником из-за их термодинамически неравновесного состояния (высокой свободной энергии). Можно предположить, что нанесенный слой Pt способствует формированию более устойчивого состояния в системе Pt/Ir-GaAs, требующего большей температуры для возбуждения процессов взаимодействия.

Обратные характеристики контактов с Ir и Pt/Ir носят качественно такой же характер, как и характеристики, приведённые в [9]. Пробой в них, судя по величине пробивного напряжения $V_{пр}$, носит локальный характер и, вероятно, связан с дефектами структуры с высокими встроенными электрическими полями, облегчающими пробой. На величину $V_{пр}$ в обоих типах контактов значительное влияние оказывает периферийный диэлектрик (SiO_2) (как и в контакте с Ir, согласно [9]). Авторы объясняют это наличием больших упругих напряжений по периферии контакта, которые способствуют пробоем благодаря уменьшению ширины запрещённой зоны. На это указывает тот факт, что удаление SiO_2 с периферии контакта приводит к резкому росту пробивного напряжения. Для установления истинной природы реальных обратных характеристик контактов GaAs с Ir и Pt/Ir требуются дополнительные исследования.

Литература

1. Interfacial interactions of evaporated iridium thin films with (100) GaAs / К.М. Ю., Т. Сандс, J.M. Jaklevic, E.E. Haller // Journal of Applied Physics. – 1987. – Vol. 62, No. 5. – P. 1815–1820.

2. A comparative study of phase stability and film morphology in thin-film M/GaAs systems (M = Co, Rh, Ir, Ni, Pd, and Pt) / T. Sands, V.G. Keramidias, K.M. Yu, J. Washborn, K.J. Krishnan // Journal of Applied Physics. – 1987. – Vol. 62, No. 5. – P. 2070–2079.

3. Schulz K.J. Interfacial reactions in the Ir/GaAs system / K.J. Schulz, O.A. Musbah, Y.A. Chang // Journal of Applied Physics. – 1990. – Vol. 67, No. 11. – P. 6798–6806.

4. High-temperature stable Ir-Al/n-GaAs Schottky diodes / T. Lalinsky, D. Greģusova, Z. Mozolova, J. Breza, P. Vogrinčić // Applied Physics Letters. – 1994. – Vol. 64, No. 14. – P. 1818–1820.

5. Батенков В.А. Влияние температуры и газовой среды на деградацию диодов с барьером Шоттки / В.А. Батенков, Л.Н. Сысоева // Арсенид галлия: тезисы докладов. IV Всесоюз. совещания по исследованию арсенида галлия. – Томск: Изд-во ТГУ, 1978. – С. 50–51.

6. Батенков В.А. Электроосаждение иридия на арсенид галлия / В.А. Батенков, Л.В. Фомина, Я.Г. Панов // Известия АлтГУ. – 1996. – № 1. – С. 65–67.

7. Батенков В.А. Создание выпрямляющих контактов к арсениду галлия электроосаждением платиновых металлов / В.Ф. Батенков, Л.В. Фомина, Е.М. Сарыгина // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий: матер. II Всерос. науч. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – Т. 2. – С. 210–212.

8. Пат. 2 530 963 РФ, МПК С 25 D 3/50, С 25 D 7/12. Электролит для химического осаждения иридия на арсенид галлия и способ его приготовления / Т.П. Бекезина (РФ), Г.М. Мокроусов (РФ), В.Г. Божков (РФ), В.А. Бурмистрова (РФ), Н.А. Торхов (РФ), А.В. Шмаргунов (РФ). – № 2013 101 201/02; заявл.10.01.13; опублик. 20.10.14, Бюл. № 29.

9. The Ir-n-GaAs Schottky barrier contacts made by electrochemical deposition / V.G. Bozhkov, A.V. Shmargunov, T.P. Bekezina, N.A. Torkhov, V.A. Novikov // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115. – P. 224505.

10. Божков В.Г. Контакты металл – полупроводник: физика и модели. – Томск: ИД Том. гос. ун-та, 2016. – 528 с.

11. Wagner L.F. A note on the correlation between the Schottky-diode barrier height and the ideality factor as determined from I-V measurements / L.F. Wagner, R.W. Joung, A. Sugeran // IEEE Electron Device Letters. – 1983. – Vol. EDL-4, No. 9. – P. 320–322.

Божков Владимир Григорьевич

Доктор техн. наук, проф., вед. науч. сотр.

Акционерно общества «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (АО «НИИПП») Красноармейская ул., д. 99а, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7 (382-2) 28-81-22
Эл. почта: bozhkov_vg@niipp.ru

Бекезина Татьяна Петровна

Науч. сотр. АО «НИИПП»

Красноармейская ул., д. 99а, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7 (382-2) 28-81-22
Эл. почта: t-bekezina@mail.ru

Бурмистрова Виктория Андреевна

Инженер-технолог 2-й кат. АО «НИИПП»

Красноармейская ул., д. 99а, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7 (382-2) 28-81-22
Эл. почта: burmistrova_va@niipp.ru

Bozhkov V.G., Bekezina T.P., Burmistrova V.A.
Schottky barrier diodes based on thermally resistant Ir-GaAs and Pt/Ir-GaAs contacts created by electrochemical deposition

The article is devoted to the study of the thermal stability of Ir-GaAs and Pt/Ir-GaAs contacts obtained by electrochemical deposition using technology developed by the authors. The choice of metallization is due to a number of reasons, which are discussed in the paper. One of the most important ones is the increased thermal stability of contacts, that enables its use in power devices of semiconductor electronics in wide frequency range. The forward and reverse current – voltage (I – V) characteristics of the contacts in the range of diameters from 500 to 5 μm and their following parameters are studied: ideality factor n , measured and effective barrier heights Φ_{bm} and Φ_{bl} , reverse voltage. It has been shown that the covering of iridium with a thin layer of Pt increases its thermal stability. A peculiarity of the results is a higher thermal stability of contacts with a small diameter.

Keywords: gallium arsenide, iridium, electrochemical deposition, current-voltage characteristics, thermal stability, ideality factor, barrier height.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-48-52

References

1. Yu K.M., Sands T., Jaklevic J.M., Haller E.E. Interfacial interactions of evaporated iridium thin films with (100) GaAs. *Journal of Applied Physics*, 1987, vol. 62, no. 5, pp. 1815–1820.
2. Sands T., Keramidas V.G., Yu K.M., Washborn J., Krishnan K. A comparative study of phase stability and film morphology in thin-film M/GaAs systems (M = Co, Rh, Ir, Ni, Pd, and Pt). *Journal of Applied Physics*, 1987, vol. 62, no. 5, pp. 2070–2079.
3. Schulz K.J., Musbah O.A. and Chang Y.A. Interfacial reactions in the Ir/GaAs system. *Journal of Applied Physics*, 1990, vol. 67, no. 11, pp. 6798–6806.
4. Lalinsky T., Grešusova D., and Mozolova Z., Breza J., Vogrinčić P. High-temperature stable Ir-Al/n-GaAs Schottky diodes. *Applied Physics Letters*, 1994, vol.64, no. 14, pp. 1818–1820.
5. Batenkov V.A., Sysoeva L.N. *Efekt temperatury i gazovoi sredy na degradatsiyu diodov s barierom Schottky* [The effect of temperature and gas environment on the degradation of diodes with a Schottky barrier]. Arsenid Galliya: Tezisy dokladov. Chetvertoe Vsesoyuznoe Soveshchanie po Issledovaniyu Arsenida Galliya [Gallium arsenide: Thesis of proceedings. Fourth All-Union Conference on the Study of Gallium Arsenide]. Tomsk: TSU Publishing House, 1978, pp. 50–51 (in Russ.).
6. Batenkov V.A., Fomina L.V., Panov Ya.G. *Elektroosazhdenie iridiya na arsenid galliya* [Electrodeposition of iridium on gallium arsenide]. *Izvestiya AltGU*, 1996. No. 1, pp. 65–67 (in Russ.).
7. Batenkov V.A., Fomina L.V., Sarygina E.M. *Sozdanie vypryamlyayushih kontaktov k arsenidu galliya eletroosashdeniem platinovyh metallov* [Creating rectifying contacts to gallium arsenide by electrodeposition of platinum metals]. *Khimiya i khimicheskaya Tekhnologiya na Rubezhe Tysyachetii: Materialy II Vserossiiskoi nauch. konf.* [Chemistry and chemical technology at the turn of the millennium: Materials of the II All-Russian Scientific Conference], Tomsk, 2002, vol. 2, pp. 210–212 (in Russ.).
8. Bekezina T.P., Mokrousov G.M., Bozhkov V.G., Burmistrova V.A., Torkhov N.A., Shmargunov A.V. *Electrolit dlia a elektrokhimicheskogo osazhdeniya iridiya na arsenide gallium I sposob ego prigotovleniya* [Electrolyte for electrochemical deposition of iridium on gallium arsenide and method of preparation thereof]. Patent RF, no. 2530963, 2014 (in Russ.).
9. Bozhkov V.G., Shmargunov A.V., Bekezina T.P., Torkhov N.A., and Novikov V.A. The Ir-n-GaAs Schottky barrier contacts made by electrochemical deposition *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 115, pp. 224505.
10. Bozhkov V.G. *Kontakty metall – poluprovodnik: fizika i modeli* [Contacts metal – semiconductor: physics and models]. Tomsk: Publishing House of TGU, 2016, 528 p. (in Russ.).
11. Wagner L.F., Joung R.W., Sugeran A. A note on the correlation between the Schottky-diode barrier height and the ideality factor as determined from I-V measurements. *IEEE Electron Device. Letters*. 1983, vol. EDL-4, no. 9, pp. 320–322.

Vladimir G. Bozhkov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
 Leading researcher, Department of Semiconductor Devices
 Research Institute of Semiconductor Devices
 99a, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634034
 Phone: +7 (382-2) 28-81-22
 Email: bozhkov_vg@niipp.ru

Tatyana P. Bekezina

Researcher, Department of Semiconductor Devices, Research
 Institute of Semiconductor Devices
 99a, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634034
 Phone: +7 (382-2) 28-81-22
 Email: t-bekezina@mail.ru

Victoriya A. Burmistrova

Engineer-Technologist of 2nd category,
 Department of Semiconductor Devices,
 Research Institute of Semiconductor Devices
 99a, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634034
 Phone: +7 (382-2) 28-81-22
 Email: burmistrova_va@niipp.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

УДК 519.163

Д.В. Кручинин

Модификация метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе применения производящих функций многих переменных и приближенных вычислений

Предложен модифицированный метод построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ, который отличается от оригинального и его модификаций применением комплексного метода получения явных выражений коэффициентов производящих функций многих переменных для нахождения выражения функции мощности комбинаторного множества, в том числе определяемого несколькими параметрами. Также предложенный модифицированный метод отличается применением приближенных вычислений и двоичного поиска для поиска выбранного сына ИЛИ-узла, что позволяет снижать вычислительную сложность алгоритмов генерации по рангу. С целью апробации предложенного модифицированного метода построения алгоритмов комбинаторной генерации разработаны новые алгоритмы ранжирования и генерации по рангу для комбинаторного множества самонепересекающихся решеточных путей на плоскости. В данном случае применение двоичного поиска позволило сократить в среднем количество требуемых вычислительных операций и получить лучшее значение вычислительной сложности по сравнению с исходной версией алгоритма.

Ключевые слова: комбинаторная генерация, производящие функции многих переменных, приближенные вычисления, двоичный поиск, решеточный путь, алгоритм ранжирования, алгоритм генерации по рангу.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-55-60

Структура многих информационных объектов может быть представлена в виде иерархической или рекурсивной зависимости. Для представления и кодирования таких информационных объектов достаточно хорошо подходит применение древовидных структур данных. В свою очередь, это приводит к возможности описания исследуемого информационного объекта с помощью формального комбинаторного множества, для которого применимы различного рода алгоритмы комбинаторной генерации [1–3].

Комбинаторное множество – это конечное множество, элементы которого имеют некоторую структуру и имеется процедура построения элементов этого множества. Комбинаторная генерация – раздел наук на стыке информатики, комбинаторики и дискретной математики, в рамках которого исследуются методы и алгоритмы генерации элементов комбинаторных множеств. В качестве базовых типов алгоритмов комбинаторной генерации можно выделить алгоритмы последовательной генерации, алгоритмы ранжирования, алгоритмы генерации по рангу и алгоритмы генерации случайных объектов [3].

Можно выделить несколько общих подходов к построению новых алгоритмов генерации, например, поиск с возвратом [4], ЕСО-метод [5] и др. [6–8]. Представленная работа посвящена исследованию метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе применения структур деревьев И/ИЛИ [9–11]. Данный метод может быть применен для последовательной генерации, а также ранжирования и генерации по рангу комбинаторных объектов. Метод основан на представлении комбинаторного множества в форме структуры дерева И/ИЛИ, количество вариантов которого совпадает со значением функции мощности.

Модификация с точки зрения применения производящих функций многих переменных

Если для исследуемого комбинаторного множества A не известно выражение функции мощности f , принадлежащей алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$, то метод на основе деревьев И/ИЛИ не может быть применен для разработки алгоритмов комбинаторной генерации. Для решения данной проблемы предлагается применение математического аппарата теории производящих функций, а именно: применение разработанного комплексного метода получения коэффициентов производящих функций многих переменных.

Производящие функции являются одним из основных инструментов, применяемых в современной комбинаторике [12, 13]. Если рассмотреть комбинаторное множество A_n , определяемое одним параметром n (например, размерность каждого объекта комбинаторного множества), тогда функция мощности $f(n) = |A_n|$ может быть определена через коэффициенты обыкновенной производящей функции

$$F(x) = \sum_{n \geq 0} f_n x^n = \sum_{n \geq 0} f(n) x^n = \sum_{n \geq 0} |A_n| x^n.$$

Если комбинаторное множество определяется набором из нескольких параметров n, m, \dots, l , тогда функция мощности $f(n, m, \dots, l) = |A_{n, m, \dots, l}|$ может быть определена через коэффициенты производящей функции многих переменных

$$\begin{aligned} F(x, y, \dots, z) &= \sum_{n \geq 0} \sum_{m \geq 0} \dots \sum_{l \geq 0} f_{n, m, \dots, l} x^n y^m \dots z^l = \\ &= \sum_{n \geq 0} \sum_{m \geq 0} \dots \sum_{l \geq 0} f(n, m, \dots, l) x^n y^m \dots z^l = \\ &= \sum_{n \geq 0} \sum_{m \geq 0} \dots \sum_{l \geq 0} |A_{n, m, \dots, l}| x^n y^m \dots z^l. \end{aligned}$$

Таким образом, если для исследуемого комбинаторного множества известна производящая функция (в том числе производящая функция многих переменных), которая определяет значения функции мощности данного комбинаторного множества, то ее коэффициенты $f_{n,m,\dots,l}$ определяют значения самой функции мощности $f(n,m,\dots,l)$. Тогда, получив явное выражение коэффициентов производящей функции, становится известным явное выражение $|A_{n,m,\dots,l}|$ для функции мощности соответствующего комбинаторного множества. Подходящим средством для решения данной задачи является разработанный комплексный метод получения коэффициентов производящих функций многих переменных [14].

Модификация с точки зрения применения приближенных вычислений и двоичного поиска

Анализ общего алгоритма генерации по рангу варианта дерева И/ИЛИ показывает, что часть его вычислений направлена лишь на поиск позиции k выбранного в варианте дерева И/ИЛИ сына ИЛИ-узла среди всех его сыновей (строки 17–22 Алгоритма 2 в [11]). В данном случае происходит вычисление частичных сумм вида

$$S_k = \sum_{i=1}^k w(s_i^{(z)})$$

и выполняется поиск значения параметра k , для которого выполняется условие

$$S_{k-1} \leq l < S_k. \quad (1)$$

Если в структуре дерева И/ИЛИ присутствует ИЛИ-узел с количеством сыновей, которое линейно зависит от некоторого параметра n исследуемого комбинаторного множества, то для худшего случая выполнения алгоритма генерации по рангу его вычислительная сложность увеличивается в n раз. То есть только для поиска значения параметра k (без учета всех остальных действий) оценка вычислительной сложности алгоритма генерации по рангу примет линейный вид. Для уменьшения вычислительной сложности предлагается реализовать:

1. Поиск значения параметра k на основе методов приближенных вычислений. В данном случае на основе формул вычисления значения $w(s_i^{(z)})$ или частичных сумм S_k находится значение k^* , являющееся приближенным решением неравенства (1):

$$k^* = \text{SolveApprox}(S_{k-1} \leq l < S_k).$$

Далее исследуется точность полученного приближенного решения k^* и производится поиск точного решения k в пределах заданной окрестности δ . Тогда оценка вычислительной сложности поиска значения параметра k изменится с $O(n)$ на $O(n^* + \delta)$, где $O(n^*)$ определяет оценку вычислительной сложности для функции SolveApprox . Если $n^* + \delta \ll n$, то получаем значительное уменьшение количества выполняемых операций.

2. Поиск значения параметра k на основе метода двоичного поиска. В данном случае предполагается наличие явной формулы для вычисления частичных сумм S_k . Запишем следующее неравенство для частичных сумм:

$$0 < S_1 < S_2 < \dots < S_{n-1} < S_n.$$

Далее воспользуемся методом двоичного поиска для поиска точного решения неравенства (1)

$$k = \text{BinarySearch}(S_{k-1} \leq l < S_k).$$

Тогда оценка вычислительной сложности поиска значения параметра k изменится с $O(n)$ на $O(\log_2 n)$. Если вычислительная сложность расчета частичной суммы S_k не превышает вычислительную сложность расчета значения $w(s_i^{(z)})$, то количество выполняемых операций уменьшается.

Обобщая все предлагаемые дополнения к оригинальному алгоритму, получаем модифицированный метод построения алгоритмов комбинаторной генерации, который можно представить в виде последовательности следующих шагов:

1. Если известно выражение функции мощности $f(n,m,\dots,l) = |A_{n,m,\dots,l}|$ комбинаторного множества $A_{n,m,\dots,l}$, принадлежащее алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$, то переход на шаг 4.

2. Если известно выражение производящей функции многих переменных $F(x,y,\dots,z)$ для последовательности значений функции мощности $f(n,m,\dots,l)$ комбинаторного множества $A_{n,m,\dots,l}$, то применить комплексный метод получения явных выражений коэффициентов производящих функций многих переменных. Иначе дальнейшее применение метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ невозможно.

3. Если получено выражение функции мощности $f(n,m,\dots,l)$ комбинаторного множества $A_{n,m,\dots,l}$, принадлежащее алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$, то переход на шаг 4. Иначе дальнейшее применение метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ невозможно.

4. На основе выражения функции мощности $f(n,m,\dots,l)$ комбинаторного множества $A_{n,m,\dots,l}$ построить структуру дерева И/ИЛИ D .

5. Определить биекцию $A_{n,m,\dots,l} \leftrightarrow W(D)$ между элементами a комбинаторного множества $A_{n,m,\dots,l}$ и множества всех вариантов v дерева И/ИЛИ D в виде алгоритмов $\text{ObjectToVariant}(a, D)$ и $\text{VariantToObject}(v, D)$.

6. Определить биекцию $W(D) \leftrightarrow \mathbb{N}_{|W(D)|}$ между элементами множества всех вариантов v дерева И/ИЛИ D и конечного множества натуральных чисел $\mathbb{N}_{|W(D)|} = \{0, 1, \dots, |W(D)| - 1\}$ в виде алгоритмов $\text{RankVariant}(v, D)$ и $\text{UnrankVariant}(r, D)$.

7. Если в структуре дерева И/ИЛИ D присутствует ИЛИ-узел с количеством сыновей, которое зависит от параметров комбинаторного множества $A_{n,m,\dots,l}$, то попробовать уменьшить вычислительную сложность алгоритма $\text{UnrankVariant}(r,D)$ за счет применения методов приближенных вычислений или метода двоичного поиска для поиска выбранного сына ИЛИ-узла.

Предложенный модифицированный метод построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ отличается от оригинального метода и его модификаций применением разработанного комплексного метода получения явных выражений коэффициентов производящих функций многих переменных для нахождения выражения функции мощности комбинаторного множества, в том числе определяемого несколькими параметрами (отражено в действиях шага 2). Также предложенный модифицированный метод отличается применением методов приближенных вычислений и метода двоичного поиска для поиска выбранного сына ИЛИ-узла, что позволяет снижать вычислительную сложность алгоритмов генерации по рангу (отражено в действиях шага 7).

Апробация модифицированного метода построения алгоритмов комбинаторной генерации

Рассмотрим процесс разработки новых алгоритмов ранжирования и генерации по рангу на основе предложенного модифицированного метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ для следующего комбинаторного объекта: самонепересекающийся решеточный путь на плоскости из точки $(0,0)$ в точку (n,n) с шагами вида $(0,1)$ (шаг вверх), $(1,0)$ (шаг вправо) и $(-1,0)$ (шаг влево) [15]. При этом остановимся на частном случае такого решеточного пути, содержащего всего $2(n+2)$ шагов, из которых n шагов вверх, $n+2$ шага вправо и 2 шага влево.

Данный комбинаторный объект предлагается кодировать в виде последовательности $a = (a_1, \dots, a_{2n+4})$, где каждое a_i представляет собой очередной выполненный шаг решеточного пути, при этом $a_i = "N"$ обозначает шаг вверх, $a_i = "E"$ – шаг вправо, $a_i = "W"$ – шаг влево.

Значения функции мощности данного комбинаторного множества формируют следующую целочисленную последовательность (последовательность A119578 в OEIS [16]):

0, 2, 18, 120, 700, 3780, 19404, 96096, 463320, 2187900, ...

На рис. 1 показан пример всех возможных вариантов рассматриваемых решеточных путей при $n = 2$.

Далее рассмотрим обобщение в виде комбинаторного множества таких самонепересекающихся решеточных путей из точки $(0,0)$ в точку (k,k) с двумя шагами влево для всех $k \leq n$.

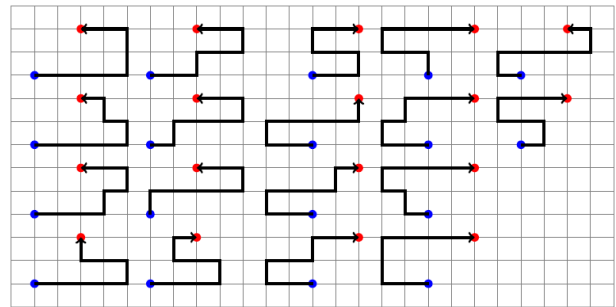


Рис. 1. Все возможные самонепересекающиеся решеточные пути из точки $(0,0)$ в точку $(2,2)$ с 2 шагами вверх, 4 шагами вправо и 2 шагами влево

Известна следующая функция мощности для множества самонепересекающихся решеточных путей из точки $(0,0)$ в точку (n,n) с n шагами вверх, $n+2$ шагами вправо и 2 шагами влево

$$f_1(n) = \binom{2n}{n} \binom{n+1}{2}$$

для $n > 0$ и $f_1(0) = 0$. Тогда функция мощности для множества самонепересекающихся решеточных путей из точки $(0,0)$ в точку (k,k) с k шагами вверх, $k+2$ шагами вправо и 2 шагами влево для набора всех значений $k \leq n$ принимает следующий вид:

$$f_2(n) = \sum_{k=0}^n f_1(k) = \sum_{k=1}^n \binom{2k}{k} \binom{k+1}{2} \quad (2)$$

Так как функция мощности (2) принадлежит алгебре $\{\mathbb{N}, +, \times, R\}$, то на ее основе можно построить структуру дерева И/ИЛИ (рис. 2).

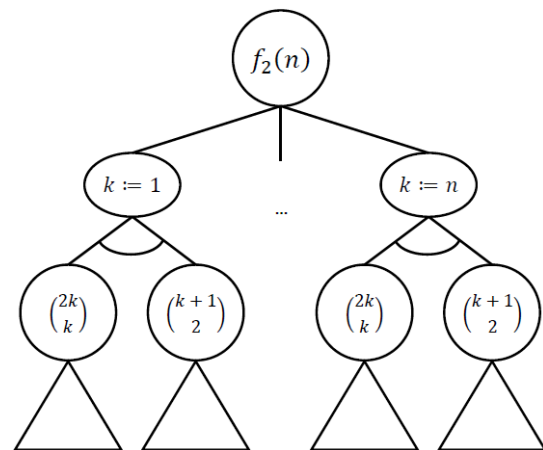


Рис. 2. Структура дерева И/ИЛИ для выражения (2)

Данная структура дерева И/ИЛИ основана на применении известной структуры дерева И/ИЛИ для комбинаторного множества сочетаний элементов. При этом левое поддерево И-узла показывает вариант самонепересекающегося решеточного пути из точки $(0,0)$ в точку (k,k) с k шагами вверх и k шагами вправо, а правое поддерево И-узла определяет вариант встраивания в данный решеточный путь 2 шага влево.

Для компактности представления каждый вариант дерева И/ИЛИ предлагается кодировать в виде последовательности $v = (k, v_1, v_2)$, в которой k определяет метку выбранного сына ИЛИ-узла, помеченного $f_2(n)$ в варианте дерева И/ИЛИ; v_1 – соответствует варианту левого поддерева И-узла; v_2 соответствует варианту правого поддерева И-узла.

На основе полученной структуры дерева И/ИЛИ с помощью общих алгоритмов ранжирования и генерации по рангу вариантов дерева И/ИЛИ разработаны соответствующие алгоритмы для комбинаторного множества решеточных путей на плоскости (Алгоритмы 1 и 2). В данных алгоритмах также используются разработанные ранее алгоритмы ранжирования и генерации по рангу вариантов деревьев И/ИЛИ для множества сочетаний элементов.

Алгоритм 1. Алгоритм ранжирования вариантов дерева И/ИЛИ, представленного на рис. 2:

```

1 Rank(  $v = (k, v_1, v_2)$ ,  $n$  )
2 begin
3    $l_1 := \text{RankC}(v_1, 2k, k)$ 
4    $l_2 := \text{RankC}(v_2, k+1, 2)$ 
5    $r := l_1 + l_2 \left( \binom{2k}{k} + \sum_{i=1}^{k-1} \binom{2i}{i} \binom{i+1}{2} \right)$ 
6   return  $r$ 
7 end
```

Алгоритм 2. Алгоритм генерации по рангу вариантов дерева И/ИЛИ, представленного на рис. 2:

```

1 Unrank(  $r$ ,  $n$  )
2 begin
3    $k := 1$ 
4    $sum := 0$ 
5   while  $sum + \binom{2k}{k} \binom{k+1}{2} \leq r$  do
6      $sum := sum + \binom{2k}{k} \binom{k+1}{2}$ 
7      $k := k + 1$ 
8   end
9    $r := r - sum$ 
10   $l_1 := r \bmod \binom{2k}{k}$ 
11   $l_2 := \text{floor} \left( r / \binom{2k}{k} \right)$ 
12   $v_1 := \text{UnrankC}(l_1, 2k, k)$ 
13   $v_2 := \text{UnrankC}(l_2, k+1, 2)$ 
14   $v = (k, v_1, v_2)$ 
15  return  $v$ 
16 end
```

В полученной структуре дерева И/ИЛИ присутствует ИЛИ-узел с количеством сыновей, которое зависит от параметров исследуемого комбинаторного множества (имеется n сыновей ИЛИ-узла, помеченного $f_2(n)$). Следовательно, в алгоритме генерации по рангу (Алгоритм 2) выполняются вычисления частичных сумм следующего вида:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \binom{2i}{i} \binom{i+1}{2}. \quad (3)$$

Таким образом, для худшего случая вычислительная сложность поиска выбранного сына ИЛИ-узла (определение значения параметра k в строках 3–8 Алгоритма 2) равна $O(n^2)$. Данная оценка вычислительной сложности складывается из вычислительной сложности $O(n)$ для расчета биномиального коэффициента, а также из максимального количества итераций в цикле while, которое равно n .

Согласно шагу 7 предложенного модифицированного метода построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ, чтобы уменьшить вычислительную сложность алгоритма генерации по рангу, применим метод двоичного поиска для поиска выбранного сына ИЛИ-узла. Для этого воспользуемся следующей формулой для вычисления частичных сумм (3):

$$S_k = \frac{(2k+1)!}{3(k-1)!k!}.$$

Тогда получаем следующую модификацию алгоритма генерации по рангу вариантов дерева И/ИЛИ, представленного на рис. 2:

Алгоритм 3. Модификация алгоритма генерации по рангу вариантов дерева И/ИЛИ, представленного на рис. 2:

```

1 Unrank(  $r$ ,  $n$  )
2 begin
3    $k := \text{BinarySearch}(S_{k-1} \leq r < S_k)$ 
4    $r := r - S_{k-1}$ 
5    $l_1 := r \bmod \binom{2k}{k}$ 
6    $l_2 := \text{floor} \left( r / \binom{2k}{k} \right)$ 
7    $v_1 := \text{UnrankC}(l_1, 2k, k)$ 
8    $v_2 := \text{UnrankC}(l_2, k+1, 2)$ 
9    $v = (k, v_1, v_2)$ 
10  return  $v$ 
11 end
```

Применение метода двоичного поиска позволяет в среднем сократить количество требуемых операций для поиска точного решения неравенства (1). В результате для худшего случая вычислительная сложность поиска выбранного сына ИЛИ-узла станет равна $O(n \log_2 n)$, что является лучшим значением по сравнению с исходной версией алгоритма.

Заключение

Основным результатом данной статьи является предложенный модифицированный метод построения алгоритмов комбинаторной генерации на основе деревьев И/ИЛИ. В данном случае модификация представлена, во-первых, с точки зрения применения производящих функций многих переменных для нахождения явных выражений функции мощности комбинаторного множества, а также с точки зрения применения приближенных вычислений и двоичного поиска для алгоритма генерации по рангу.

Также в качестве апробации метода разработаны новые алгоритмы ранжирования и генерации по рангу для комбинаторного множества самонепересекающихся решеточных путей на плоскости. В данном случае применение метода двоичного поиска для поиска выбранного сына ИЛИ-узла позволяет сократить в среднем количество требуемых вычислительных операций и получить вычислительную сложность $O(n \log_2 n)$, что является лучшим значением по сравнению с исходной версией алгоритма с вычислительной сложностью $O(n^2)$.

Литература

1. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Комбинаторные алгоритмы. – М.: Вильямс, 2013. – Т. 4А, ч. 1. – 960 с.
2. Kreher D.L. Combinatorial algorithms: Generation, enumeration, and search / D.L. Kreher, D.R. Stinson. – USA: CRC Press, 1999. – 329 p.
3. Ruskey F. Combinatorial generation. Working version (1j-CSC 425/520), 2003. – 311 p. – URL: <http://page.math.tu-berlin.de/~felsner/SemWS17-18/Ruskey-Comb-Gen.pdf>, свободный (дата обращения: 01.01.2022).
4. Reingold E.M. Combinatorial algorithms: Theory and practice / E.M. Reingold, J. Nievergelt, N. Deo. – USA: Prentice Hall, 1977. – 433 p.
5. Barucci E. Exhaustive generation of some lattice paths and their prefixes / E. Barucci, A. Bernini, R. Pinzani // *Theoretical Computer Science*. – 2021. – Vol. 878–879. – P. 47–52.
6. Flajolet P. A calculus for the random generation of combinatorial structures / P. Flajolet, P. Zimmerman, B. Cutsem // *Theoretical Computer Science*. – 1994. – Vol. 132, No. 1–2. – P. 1–35.
7. Martinez C. A generic approach for the unranking of labeled combinatorial classes / C. Martinez, X. Molinero // *Random Structures and Algorithms*. – 2001. – Vol. 19, No. 3–4. – P. 472–497.
8. Рябко Б.Я. Быстрая нумерация комбинаторных объектов // *Дискретная математика*. – 1998. – Т. 10, № 2. – С. 101–119.
9. Кручинин В.В. Методы построения алгоритмов генерации и нумерации комбинаторных объектов на основе деревьев И/ИЛИ. – Томск: В-Спектр, 2007. – 200 с.
10. Кручинин В.В. Методы, алгоритмы и программное обеспечение комбинаторной генерации: дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2010. – 387 с.
11. Shablya Y. Method for developing combinatorial generation algorithms based on AND/OR trees and its application / Y. Shablya, D. Kruchinin, V. Kruchinin // *Mathematics*. – 2020. – Vol. 8, No. 6. – Article 962.
12. Ландо С.К. Лекции о производящих функциях. – 3-е изд. – М.: Изд-во МЦНМО, 2007. – 144 с.
13. Wilf H.S. *Generatingfunctionology*. – Second edition. – USA: Academic Press, 1994. – 228 p.
14. Kruchinin D. Method for obtaining coefficients of powers of bivariate generating functions / D. Kruchinin, V. Kruchinin, Y. Shablya // *Mathematics*. – 2021. – Vol. 9, No. 4. – Article 428.
15. Gao S. Tackling sequences from prudent self-avoiding walks / S. Gao, K.-H. Chen // *Proceedings of the 2014 world congress in computer science, computer engineering, and applied computing*. – 2014. – P. 1–7.
16. Sloane N.J.A. The on-line encyclopedia of integer sequences. – URL: <https://oeis.org>, свободный (дата обращения: 01.01.2022).

Кручинин Дмитрий Владимирович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-3412-432X
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: kruchinindm@gmail.com

Kruchinin D.V.

Modification of the method for developing combinatorial generation algorithms based on the use of multivariate generating functions and approximations

This article proposes a modified method for developing combinatorial generation algorithms based on AND/OR trees. The proposed method differs from the original method and its modifications by using the method of obtaining explicit expressions for the coefficients of multivariate generating functions to find the expression for the cardinality function of a given combinatorial set (including combinatorial sets defined by several parameters). Also, the proposed method is distinguished by the use of approximation methods and the binary search to find the selected son of the OR node. This reduces the computational complexity of the unranking algorithms. In order to test the proposed method, a new ranking and unranking algorithms were developed for a combinatorial set of self-avoiding lattice paths. In this case, the use of binary search reduced on average the number of required computational operations and a better computational complexity compared to the original version of the algorithm were obtained.

Keywords: combinatorial generation, multivariate generating functions, approximations, binary search, lattice path, ranking algorithm, unranking algorithm.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-55-60

References

1. Knuth D.E. *The Art of Computer Programming. Vol. 4A: Combinatorial Algorithms, Part 1*. USA, Addison-Wesley, 2011, 883 p.
2. Kreher D.L., Stinson D.R. *Combinatorial algorithms: Generation, Enumeration, and Search*. USA, CRC Press, 1999, 329 p.
3. Ruskey F. *Combinatorial Generation*. Working version (1j-CSC 425/520). 2003, 311 p. Available at: <http://page.math.tu-berlin.de/~felsner/SemWS17-18/Ruskey-Comb-Gen.pdf> (Accessed: January 01, 2022).
4. Reingold E.M., Nievergelt J., Deo N. *Combinatorial Algorithms: Theory and Practice*. USA, Prentice Hall, 1977, 433 p.
5. Barucci E., Bernini A., Pinzani R. Exhaustive generation of some lattice paths and their prefixes. *Theoretical Computer Science*, 2021, vol. 878–879, pp. 47–52.
6. Flajolet P., Zimmerman P., Cutsem B. A calculus for the random generation of combinatorial structures. *Theoretical Computer Science*, 1994, vol. 132, no. 1–2, pp. 1–35.
7. Martinez C., Molinero X. A generic approach for the unranking of labeled combinatorial classes. *Random Structures and Algorithms*, 2001, vol. 19, no. 3–4, pp. 472–497.
8. Ryabko B.Ya. Fast enumeration of combinatorial objects. *Discrete Mathematics and Applications*, 1998, vol. 8, no. 2, pp. 163–182.
9. Kruchinin V.V. *Metody postroenija algoritmov generacii i numeracii kombinatornyh obektov na osnove derevev I/ILI* [Methods for developing algorithms for ranking and

unranking combinatorial objects based on AND/OR trees]. Tomsk, 2007, 200 p. (in Russ.).

10. Kruchinin V.V. *Metody, algoritmy i programmnoye obespecheniye kombinatornoy generatsii. Diss. doctor nauk* [Methods, algorithms and software for combinatorial generation. Doctor Diss.]. Tomsk, 2010, 387 p.

11. Shablya Y., Kruchinin D., Kruchinin V. Method for developing combinatorial generation algorithms based on AND/OR trees and its application. *Mathematics*, 2020, vol. 8, no. 6, Article 962.

12. Lando S.K. *Lectures on generating functions*. USA, American Mathematical Society, 2003, 148 p.

13. Wilf H.S. *Generatingfunctionology*. Second edition. USA, Academic Press, 1994, 228 p.

14. Kruchinin D., Kruchinin V., Shablya Y. Method for obtaining coefficients of powers of bivariate generating functions. *Mathematics*, 2021, vol. 9, no. 4, Article 428.

15. Gao S., Chen K.-H. *Tackling Sequences from Prudent Self-avoiding Walks*. Proceedings of the 2014 world con-

gress in computer science, computer engineering, and applied computing, 2014, pp. 1-7.

16. Sloane N.J.A. The on-line encyclopedia of integer sequences. Available at: <https://oeis.org/> (Accessed: January 01, 2022).

Dmitry V. Kruchinin

Candidate of Science in Mathematics and Physics,
Associated Professor, Department of Computer Control and
Design Systems, Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0003-3412-432X

Phone: +7 (382-2) 41-47-17

Email: kruchinindm@gmail.com

УДК 004.056

Д.С. Милько, А.В. Данеев, А.Л. Горбылев

База знаний экспертной системы оценки угроз безопасности информации

Оценка угроз безопасности информации необходима для разработки соответствующей модели угроз. Результаты оценки угроз применяются для выбора и обоснования требуемых мер при построении систем защиты информации. В феврале 2021 г. вступил в силу новый методический документ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю Российской Федерации (ФСТЭК России), обязательный к исполнению всеми организациями, которые проводят оценку угроз безопасности информации.

Описан подход к автоматизации исключения неактуальных угроз безопасности информации путем разработки экспертной системы. Сформирована база знаний экспертной системы, описан подход к формированию базы знаний. Сформулированы ключевые понятия для экспертной системы оценки угроз, такие как область знаний, эксперт, пользователь. Приведена схема работы экспертной системы оценки угроз безопасности информации. Приведены практические результаты, полученные от внедрения разработанной базы знаний экспертной системы, на предприятии, занимающемся технической защитой конфиденциальной информации.

Приведено обоснование выбора экспертной системы в качестве метода автоматизации процедуры оценки угроз безопасности информации. Проведено сравнение экспертных систем с более современными технологиями автоматизации (искусственные нейронные сети).

Сделаны выводы об эффективности разработанной базы знаний, а также о необходимости разработки более удобного интерфейса и машины логического вывода.

Ключевые слова: угрозы безопасности информации, модель угроз, экспертная система, база знаний, банк данных угроз.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-61-69

Процедура разработки модели угроз безопасности информации, необходимая при построении систем защиты информации [1], усложнилась с введением ФСТЭК России в действие нового методического документа в феврале 2021 г. [2]. Внедрение в процедуру оценки угроз программного комплекса автоматизации позволит снизить временные, финансовые и иные издержки организаций на проведение оценки угроз [3]. В настоящий момент средства автоматизации оценки угроз безопасности информации отсутствуют, несмотря на законодательно предусмотренную возможность использования таких средств [4].

Экспертная система (ЭС) – это программный комплекс, который оперирует знаниями в определенной предметной области в целях решения проблем или выработки рекомендаций. ЭС имеют многочисленные применения: диагностика неисправностей в технических и биологических системах, планирование, проектирование, анализ сложных объектов, а также анализ наблюдательных данных [5].

Экспертные знания являются ключевым компонентом экспертной системы и формируются на основе надежной информации [6]. Эксперт структурирует знания таким образом, чтобы представить их в формальном виде. Полученное представление (база знаний) позволяет пользователям ЭС достичь результата, аналогичного экспертному, при условии, что ЭС будет работать по такому же алгоритму, что и эксперт-человек.

ЭС включает следующие основные функции:

- приобретение знаний;
- представление знаний;
- управление процессом поиска решений;
- разъяснение принятого решения.

Целью настоящей работы является разработка базы знаний ЭС оценки угроз безопасности информации. Задачи, решаемые в настоящей работе:

- обоснование выбора ЭС в качестве метода автоматизации процедуры оценки угроз;
- определение ключевых понятий, которые необходимы при разработке ЭС;
- разработка базы знаний ЭС оценки угроз безопасности информации;
- апробация базы знаний при прикладной разработке модели угроз.

Результатом выполнения настоящей работы планируется представление знаний об угрозах безопасности в виде базы знаний. База знаний позволит пользователям использовать эти знания при наличии машины логического вывода. Источником знаний является Банк данных угроз (БДУ), ведение которого осуществляется ФСТЭК России [7].

В первом разделе настоящей работы обосновывается выбор ЭС в качестве метода оценки угроз безопасности информации. Во втором разделе определены ключевые понятия, используемые при разработке ЭС оценки угроз безопасности информации. Третий раздел включает описание процедуры разработки базы знаний ЭС. В четвертом разделе приведены результаты практического внедрения базы знаний ЭС на предприятии. Выводы о результатах разработки базы знаний ЭС приведены в заключении.

Обоснование выбранного метода

Как уже было заявлено ранее, в качестве метода для автоматизации оценки угроз безопасности информации была выбрана разработка соответствующей ЭС. Такой выбор обоснован совокупностью обстоятельств, указанных ниже.

В сфере информационной безопасности технологии искусственного интеллекта чаще всего находят применение с целями:

- предотвращения инцидентов информационной безопасности;
- противодействия атакам, связанным с социальной инженерией;
- исследования уязвимостей;
- противодействия сложным атакам;
- автоматизации служебных задач при противодействии атакам;
- внедрения функций безопасности в приложения [8, 9].

Центром компетенций Национальной технологической инициативы на базе Московского физико-технического института экспертные, рекомендательные, информационно-аналитические системы, автоматизация проектирования и управления выделены в одно из ключевых направлений, определяющих содержание технологии «Искусственный интеллект» [10].

Несмотря на актуальность задачи оценки угроз безопасности информации, технологии искусственного интеллекта для её решения ранее не применялись.

По масштабу решаемых задач технологии искусственного интеллекта принято разделять на сильные (способные решать универсальные задачи) и слабые (способные решать только узкоспециализированные задачи). К сильным технологиям искусственного интеллекта относятся искусственные нейронные сети (ИНС). К слабым технологиям искусственного интеллекта – ЭС [5].

Несмотря на все достоинства сильных технологий искусственного интеллекта, остается нерешенным вопрос прозрачности (объяснимости) ИНС. Разобраться в структуре связей современной ИНС человек не в состоянии. Для человека ИНС представляет собой «черный ящик», решениям которого приходится слепо доверять. В этом ИНС проигрывают прошлому поколению технологий искусственного интеллекта – ЭС. Поскольку ЭС основаны на системе жестких правил, они всегда способны объяснить своё решение, показать, какая именно цепочка правил была применена в каждом конкретном случае [5].

Кроме этого, против более широкого применения ИНС в сфере информационной безопасности имеются юридические причины. Специалист в сфере информационной безопасности в России несет предусмотренную законом ответственность за принятые им решения. За неверно принятые решения при эксплуатации объектов критической информационной инфраструктуры, которые повлекли нарушения информационной безопасности, ч. 3 ст. 274.1 УК РФ [11] предусмотрена уголовная ответственность. За неверно принятые решения при эксплуатации иных информационных систем, которые повлекли нарушение информационной безопасности, ст. 13.12 КоАП РФ [12] предусмотрена административная ответственность. Кроме этого, за неверно

принятые решения специалист по защите информации может быть привлечен к дисциплинарной или гражданско-правовой ответственности [13]. В связи с указанными обстоятельствами при нарушении информационной безопасности специалист должен суметь логически обосновать принятые им решения, чтобы избежать ответственности за неверно принятое решение. Достоверно логически обосновать решение, принятое «черным ящиком», не представляется возможным.

В отличие от сильных технологий искусственного интеллекта ЭС позволяют в определенной узкой области знаний проводить рассуждения по такому же принципу, как рассуждал бы эксперт-человек [6]. Использование ЭС является «прозрачным», и в случае наступления негативных последствий специалист будет способен достоверно логически обосновать решение, принятое системой.

С точки зрения программирования разработка ЭС относится к непроцедурному подходу решения задач. От эксперта-человека не требуется описание точных подробностей того, как должна быть решена задача. Основной объем работы заключается в том, чтобы указать что именно должно быть сделано, без прямого указания как ЭС должна это сделать. Кроме этого, процедурные методы не позволяют справляться с ситуациями неправильных, неполных или несогласованных данных [6].

К недостаткам ЭС относится неспособность обладать «глубинными знаниями» о моделируемых системах. Программирование ЭС осуществляется в большей степени с использованием «поверхностных знаний» [6].

Применительно к сфере информационной безопасности можно привести следующий пример, демонстрирующий указанный недостаток. ЭС не будет способна объяснить принятое ей решение при оценке угрозы безопасности информации на глубоком уровне. ЭС делает логический вывод на основе знаний о нарушителях, объектах воздействия и последствиях атаки, запрограммированных в нее экспертом-человеком. При этом ЭС ограничена только указанным объемом знаний. Такие знания являются поверхностными, так как не включают полноценного объяснения причинно-следственных связей между нарушителями, объектами воздействия и последствиях атаки. В частности, ЭС не способна вместить «глубинных знаний» о возможной мотивации нарушителя, физических принципах функционирования объектов воздействия или стоимости ущерба. Для применения метода ЭС в таком случае потребуется разработка отдельных систем для каждой из перечисленных задач. Однако практический опыт разработки моделей угроз безопасности информации показывает, что использование «глубинных знаний» в процессе исключения неактуальных угроз безопасности не требуется при условии использования БДУ ФСТЭК России.

Резюмируя, основным недостатком ЭС в сравнении с ИНС является узость предметной области. Несмотря на это, ЭС [6]:

- способны ускорять решение задач;
- обладают повышенной доступностью;
- обладают постоянством;
- способны снизить опасность негативных последствий;
- способны получать знания из многих источников;
- обладают повышенной надежностью;
- способствуют объяснению;
- имеют быстрый отклик.

По этим причинам использование ЭС является обоснованным компромиссом при необходимости автоматизации процедуры оценки угроз безопасности информации.

Определение ключевых компонентов экспертной системы оценки угроз безопасности информации

Для функционирования ЭС требуется наличие следующих компонентов: базы знаний, машины логического вывода, блока общения (рис. 1, 2) [5].

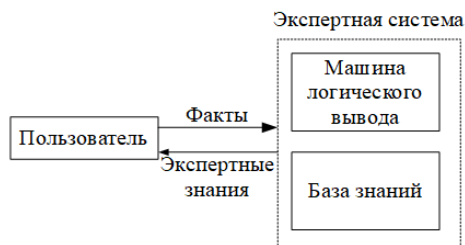


Рис. 1. Структура ЭС по Дж. Джарратано и Г. Райли [6]

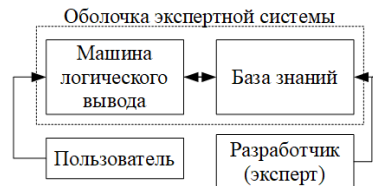


Рис. 2. Структура ЭС по П. Джексону [14]

Первым шагом в решении любой задачи с применением метода разработки ЭС является определение предметной области, в рамках которой необходимо найти решение (области знаний).

Первым шагом в решении любой задачи с применением метода разработки ЭС является определение предметной области, в рамках которой необходимо найти решение (области знаний).

В широком смысле предметной областью для работы эксперта-человека, который решает задачу оценки угроз, является информационная безопасность. В узком смысле областью знаний применительно к решаемой задаче является оценка угроз безопасности информации. Такой выбор области знаний соответствует критерию правильности выбора области знаний – в указанной области знаний эксперт-человек способен сформировать этапы решения задачи. Порядок процедуры оценки угроз безопасности информации может быть определен экспертом-человеком в соответствии с методическим документом ФСТЭК России. Для оценки угроз последовательно проводятся:

- определение негативных последствий от реализации угроз;
- определение возможных объектов воздействия;
- определение источников угроз;
- оценка способов реализации угроз;
- оценка актуальности угроз [2].

Когда определены этапы рассуждений, аналогичные действия вместо эксперта-человека могут быть выполнены пользователем, использующим ЭС. Система при решении задачи повторяет алгоритм, запрограммированный экспертом-человеком [6]. ЭС оценки угроз безопасности информации фактически эмулирует применение методического документа ФСТЭК России [2] экспертом-человеком.

Термином «эксперт-человек» или «эксперт» обозначается личность, обладающая экспертными знаниями в определенной области [6]. Для решения задачи оценки угроз безопасности на уровне эксперта необходимо широкое использование специализированных знаний в указанной сфере.

Корректность выбора эксперта-человека определяется Дж. Джарратано и Г. Райли следующим условием. Эксперт-человек должен решать поставленную задачу гораздо более эффективно, чем большинство людей. Более того, некоторые из задач человек без специализированных знаний не способен решить вообще [6].

В соответствии с рекомендациями по формированию экспертной группы [2] организовывать работу экспертной группы по оценке угроз рекомендуется специалисту по защите информации, имеющему стаж работ не менее трех лет и практический опыт оценки информационных рисков. Трудовые функции по анализу угроз безопасности и оценке рисков включены в профессиональные стандарты 06.033 «Специалист по защите информации в автоматизированных системах» и 06.030 «Специалист по защите информации в телекоммуникационных системах и сетях» [15, 16]. Другие профессиональные стандарты, включающие трудовые функции по оценке угроз безопасности информации, в Реестре профессиональных стандартов Минтруда России [17] не были найдены.

Обобщая вышеперечисленное, можно сказать, что специальными навыками по оценке угроз безопасности информации обладают специалисты по защите информации, имеющие стаж работы не менее трех лет. Указанное обстоятельство подтверждает корректность выбора специалиста по защите информации в качестве эксперта для разработки ЭС оценки угроз безопасности информации по Дж. Джарратано и Г. Райли [6].

В настоящий момент в соответствии с Доктриной информационной безопасности [18] состояние информационной безопасности России характеризуется недостаточным кадровым обеспечением. Проблема нехватки квалифицированных кадров в области информационной безопасности остается нерешенной в течение длительного времени, что также

подтверждается в научных работах А.В. Царегородцева, Е.П. Цацкиной (2019), В.Н. Азарова, Ю.И. Гудкова (2015), А.А. Малюка (2011) [19–21].

В связи с нехваткой квалифицированных специалистов по защите информации одним из основных направлений, определенных Доктриной информационной безопасности, является осуществление опытных разработок в целях создания средств обеспечения информационной безопасности [18]. ЭС оценки угроз безопасности информации относится к средствам обеспечения информационной безопасности, способным снизить влияние проблемы кадрового обеспечения путем снижения трудозатрат эксперта-человека для решения задачи оценки угроз безопасности информации.

Пользователем же ЭС при исключении неактуальных угроз не обязательно должен быть эксперт со знаниями в сфере оценки угроз. Для использования ЭС достаточно обладать компетенциями пользователя. Рекомендации по формированию экспертной группы [2] позволяют включать в её состав специалистов, имеющих опыт работы не менее одного года по соответствующему направлению деятельности, в котором проводится оценка угроз безопасности информации. Такими пользователями могут являться специалисты в области информационных техноло-

гий, эксплуатации сетей связи, автоматизированных систем управления, риск-менеджеры и т.д. В частности, для оценки угроз, реализация которых может привести к финансовым рискам, также могут быть привлечены специалисты экономических подразделений.

Структура ЭС оценки угроз безопасности информации, полученная в результате сочетания структурных схем (см. рис. 1, 2) с учетом определения ключевых компонентов ЭС представлена на рис. 3.

Разработанная по такому принципу ЭС оценки угроз безопасности информации позволит предприятиям снизить затраты на проведение оценки угроз безопасности информации путем снижения затрат на привлечение специалиста по защите информации.

Разработка базы знаний экспертной системы оценки угроз безопасности

Условие актуальности угрозы безопасности информации в виде логического выражения

$$A_i = [V_i \wedge O_i \wedge H_i \wedge C_i], \quad (1)$$

где i – индекс, соответствующий одной из 222 угроз безопасности информации в БДУ ФСТЭК России; A_i – актуальность i -й угрозы; V_i – негативные последствия, связанные с ущербом от i -й угрозы; O_i – объект воздействия i -й угрозы; H_i – нарушитель (источник i -й угрозы); C_i – способ реализации i -й угрозы [4].

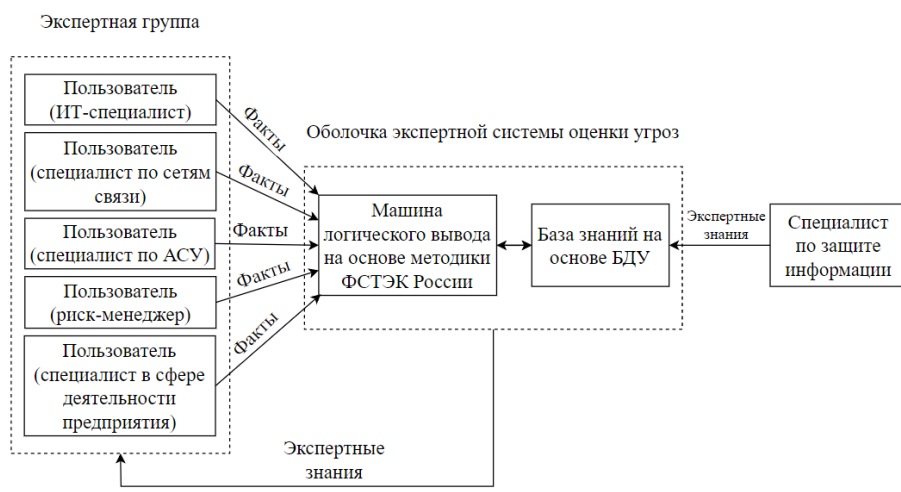


Рис. 3. Структура ЭС оценки угроз безопасности информации

Для автоматического исключения неактуальных угроз база знаний ЭС должна содержать знания:

- о возможных негативных последствиях (V_i);
- об объектах воздействия (O_i);
- о нарушителях (H_i).

ЭС с такой базой знаний позволит существенно сократить количество угроз, рассматриваемых далее аналитически.

Для формирования базы знаний в ЭС выбрано представление в виде фреймов (ячеек), наполненных слотами с характеристиками (знаниями) об угрозах [6].

Входными данными ЭС являются факты, касающиеся характеристик защищаемого объекта. Выходными данными ЭС является перечень угроз безопасности информации с указанием сведений об актуальности или неактуальности каждой угрозы. Такие сведения в совокупности с обоснованием

принятого решения являются экспертными знаниями о защищаемом объекте.

Негативные последствия от реализации угроз безопасности (V_i) представлены в БДУ ФСТЭК России в виде характеристик трех свойств безопасности информации – конфиденциальности, доступности и целостности. Существуют угрозы, способные нарушить все три свойства безопасности информации (например, УБИ.005). Также существуют угрозы, которые способны нарушить только одно свойство безопасности, например, конфиденциальность (УБИ.008), доступность (УБИ.013) или целостность (УБИ.011). Каждое из указанных свойств безопасности может быть представлено в базе знаний ЭС в виде отдельного слота с бинарной характеристикой.

Сведения об объектах воздействия (O_i) в БДУ ФСТЭК России представлены на естественном языке

ке. В работе [4] был предложен подход по формализации путем присвоения каждому объекту воздействия уникального идентификатора (ID). В настоящей работе ранее предложенный подход был упрощен и доработан. Разделение объектов воздействия на кластеры осуществляется не по признаку уровня архитектуры, а по признаку отнесения к конкретным информационным технологиям. По указанному принципу были выработаны кластеры с идентификаторами, приведенные в табл. 1. Формат идентификатора определяет принадлежность к кластеру в целом (символ «0» в конце идентификатора) или непосредственно к объекту воздействия (все остальные идентификаторы).

Таблица 1

Идентификаторы объектов воздействия	
ID	Объект воздействия
10	Грид-система
11	Ресурсные центры грид-системы
12	Узлы грид-системы
20	BIOS/UEFI
21	Микропрограммное и аппаратное обеспечение BIOS/UEFI
22	Микропрограммное обеспечение BIOS/UEFI
30	Прочее (служебный параметр)
31	Метаданные
32	Учетные данные пользователя
33	Реестр
34	База данных
35	Канал связи / Каналы связи / Каналы связи (передачи) данных
36	Ключевая система информационной инфраструктуры
37	Сетевой трафик
40	Программное обеспечение / Программы
41	Системное программное обеспечение
42	Прикладное программное обеспечение
43	Сетевое программное обеспечение
44	Микропрограммное обеспечение
45	Системное программное обеспечение, использующее реестр
46	Аутентификационные данные пользователя (программное обеспечение)
50	Информационная система / Инфраструктура информационных систем
51	Сетевой узел
52	Носитель информации / Носители информации / Машинный носитель информации / Машинные носители информации
53	Объекты файловой системы / Объект файловой системы / Файлы
54	Аппаратное обеспечение / Техническое средство / Аппаратное средство / Аппаратное устройство
55	Сервер
56	Рабочая станция / Средство вычислительной техники
57	Защищаемые данные / Информационные ресурсы
58	Сетевое оборудование / Телекоммуникационное устройство
59	Информация, хранящаяся на компьютере во временных файлах
60	Система виртуализации
61	Виртуальная машина
62	Образ виртуальной машины
63	Гипервизор
64	Виртуальные устройства
65	Виртуальные устройства хранения, обработки и передачи данных

Продолжение табл. 1

ID	Объект воздействия
66	Виртуальные устройства хранения данных
67	Виртуальные диски
68	Консоль управления гипервизором
70	Облачная система
71	Облачный сервер
72	Облачная инфраструктура
73	Информационная система, иммигрированная в облако
74	Консоль управления облачной инфраструктурой
75	Облачная инфраструктура, созданная с использованием технологий виртуализации
80	Суперкомпьютер
81	Вычислительные узлы суперкомпьютера / Вычислительный узел суперкомпьютера
82	Система хранения данных суперкомпьютера
83	Каналы передачи данных суперкомпьютера
84	Система разграничения доступа хранилища больших данных
90	Средства защиты информации / Средство защиты информации
91	Программно-аппаратные средства со встроенными функциями защиты
92	Система управления доступом, встроенная в операционную систему компьютера
100	Большие данные
101	Хранилище больших данных
102	Узлы хранилища больших данных
110	Беспроводные системы
111	Точка беспроводного доступа
120	Система охлаждения
121	Технические средства воздушного кондиционирования, включая трубопроводные системы для циркуляции охлажденного воздуха в ЦОД
130	АСУ ТП
131	Программируемые логические контроллеры
132	Распределенные системы контроля
133	Управленческие системы и другие программные средства контроля
134	Программное обеспечение автоматизированной системы управления технологическими процессами
140	Мобильное устройство / Мобильные устройства
141	Мобильное устройство и запущенные на нем приложения
142	Данные пользователя мобильного устройства (аппаратное устройство)
150	Машинное обучение / искусственный интеллект
151	Программное обеспечение (программы), использующее машинное обучение / Программное обеспечение (программы), реализующие технологии искусственного интеллекта
152	Модели машинного обучения
153	Обучающие данные машинного обучения

Для угроз, содержащих сложное описание объектов воздействия, слоты должны быть представлены в нормальной форме (конъюнкция дизъюнкций). Для этого объекты воздействия были объединены логическими связками («и», «или», «не» и т.д.). Пример представления нормальной логической связки для угрозы УБИ.180:

ОВ.121 ∧ (ОВ.131 ∨ ОВ.132 ∨ ОВ.133), (2)
 где ОВ.121, ОВ.131, ОВ.132, и ОВ.133 – объекты воздействия «техническое средство воздушного кондиционирования, включая трубопроводные системы для циркуляции охлажденного воздуха в ЦОД», «программируемые логические контроллеры», «рас-

предельные системы контроля», «управленческие системы и другие программные средства контроля» соответственно.

Нарушители (H_i) в БДУ ФСТЭК России классифицированы по потенциалу (низкий, средний и высокий) и возможности физического доступа к объекту атаки (внутренние и внешние). Комбинирование трех типов потенциала нарушителей и двух видов объектов атаки позволяет присвоить нарушителям уникальные числовые идентификаторы (ID).

Принцип формирования идентификаторов – позиционный (табл. 2). Для группы идентификаторов 11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32 и 33 первое число (от 1 до 3) показывает потенциал внешнего нарушителя, а второе число — потенциал внутреннего нарушителя (от 1 до 3).

Таблица 2

Идентификаторы нарушителей информационной безопасности

ID	Типы нарушителей
11	Внешний нарушитель с низким потенциалом Внутренний нарушитель с низким потенциалом
12	Внешний нарушитель с низким потенциалом Внутренний нарушитель со средним потенциалом
13	Внешний нарушитель с низким потенциалом Внутренний нарушитель с высоким потенциалом
21	Внешний нарушитель со средним потенциалом Внутренний нарушитель с низким потенциалом
22	Внешний нарушитель со средним потенциалом Внутренний нарушитель со средним потенциалом
23	Внешний нарушитель со средним потенциалом Внутренний нарушитель с высоким потенциалом
31	Внешний нарушитель с высоким потенциалом Внутренний нарушитель с низким потенциалом
32	Внешний нарушитель с высоким потенциалом Внутренний нарушитель со средним потенциалом
33	Внешний нарушитель с высоким потенциалом Внутренний нарушитель с высоким потенциалом
41	Внешний нарушитель с низким потенциалом
42	Внешний нарушитель со средним потенциалом
43	Внешний нарушитель с высоким потенциалом
51	Внутренний нарушитель с низким потенциалом
52	Внутренний нарушитель со средним потенциалом
53	Внутренний нарушитель с высоким потенциалом
60	Прочие

В идентификаторах группы 4X первое число «4» соответствует исключению из рассмотрения внутреннего нарушителя, а второе число — потенциал внешнего нарушителя (от 1 до 3). Аналогично для идентификаторов группы 5X первое число «5» соответствует исключению из рассмотрения внешнего нарушителя, а второе число — потенциал внутреннего нарушителя (от 1 до 3). Идентификатор «60» позволяет выделить в отдельную группу угрозы, для которой антропогенные нарушители отсутствуют (например, УБИ.142).

ФСТЭК России периодически вносит изменения в БДУ. Для упрощения процедуры сравнения актуальности данных, представленных в базе знаний и в БДУ, введены два дополнительных слота. Первый слот содержит данные о дате добавления угрозы в БДУ ФСТЭК России. Второй слот содержит данные о дате изменения угрозы в БДУ ФСТЭК России.

На основании вышеперечисленных данных определена требуемая структура для представления

знаний (рис. 4). Примеры фреймов, содержащих знания о ранее описанных угрозах, представлены на рис. 5 и 6.

```
deftemplate threat "List of TDB FSTEK of Russia"
  (slot id)
  (slot intruder)
  (slot victim)
  (slot confidentiality)
  (slot availability)
  (slot integrity)
  (slot create)
  (slot change)
)
```

Рис. 4. Ввод формата представления знаний на языке CLIPS

```
(threat (id 8)
  (intruder 11)
  (victim (41|44|32))
  (confidentiality 1)
  (availability 0)
  (integrity 0)
  (create 20.03.2015)
  (change 15.11.2019)
)
```

Рис. 5. Фрейм на языке CLIPS, содержащий знания об угрозе УБИ.008

```
(threat (id 180)
  (intruder 21)
  (victim (121&(131|132|133)))
  (confidentiality 0)
  (availability 0)
  (integrity 1)
  (create 18.08.2015)
  (change 11.02.2019)
)
```

Рис. 6. Фрейм на языке CLIPS, содержащий знания об угрозе УБИ.180

Результаты разработки базы знаний экспертной системы

В результате работы получена база знаний ЭС для 222 угроз безопасности информации, содержащая данные о возможных негативных последствиях (V_i), об объектах воздействия (O_i), о нарушителях (H_i), а также данные о датах создания и изменения угрозы.

Для получения практических данных об эффективности разработанной базы знаний была произведена апробация в ООО по защите информации «Секрет-Сервис». Специалист по защите информации провел исключение неактуальных угроз безопасности для нескольких объектов информатизации. Исключение угроз производилось вручную, но в качестве источника информации об угрозах специалист использовал разработанную базу знаний, представленную в текстовом формате. В качестве интерфейса использовался текстовый редактор NotePad++ с возможностью поиска внутри файла. Результаты работы в описанном режиме представлены в табл. 3.

Информационная система персональных данных (ИСПДн) № 1 принадлежит государственному учреждению технической сферы деятельности. В ИСПДн содержатся персональные данные четвертого уровня защищенности. Для обработки персональных данных используется несколько автоматизиро-

ванных рабочих мест. ИСПДн № 2 аналогична по характеристикам ИСПДн № 1, но принадлежит высшему учебному заведению. Апробация базы знаний на аналогичных по характеристикам ИСПДн № 1 и № 2 показала совпадающие результаты работы.

Таблица 3
Сводные результаты апробации

Объект информатизации	Начальное количество угроз	Количество угроз, исключенных по причине			Общее количество угроз, исключенных из рассмотрения	Количество угроз после взаимодействия с базой знаний
		отсутствия негативных последствий от реализации угрозы	отсутствия объектов воздействия	отсутствия нарушителей определенных категорий		
ИСПДн № 1	222	0	102	22	124	98
ИСПДн № 2	222	0	102	22	124	98
МИС	222	0	67	71	138	84
ИСПДн № 3	222	0	101	22	123	99
ИСПДн № 4	222	0	154	10	164	58

Муниципальная информационная система (МИС) принадлежит муниципальному учреждению. Информационная система отнесена к третьему классу защищенности. Ресурсы МИС размещены на выделенном сервере без использования технологий виртуализации. В связи с указанными обстоятельствами общее количество угроз, исключенных из рассмотрения для МИС, больше, чем у ИСПДн № 1 и № 2.

ИСПДн № 3 принадлежит муниципальному учреждению сферы образования. Разница в характеристиках между ИСПДн № 3 и ранее рассмотренными ИСПДн № 1 и № 2 заключается только в использовании средств электронной подписи. Указанная разница в характеристиках послужила причиной разницы в результатах.

ИСПДн № 4 принадлежит силовой структуре. В ИСПДн содержатся персональные данные третьего уровня защищенности. Для обработки персональных данных используется несколько автоматизированных рабочих мест, не имеющих выхода в общедоступные сети. Можно наблюдать наглядную разницу в результатах работы по сравнению с ИСПДн № 1–3. Число исключенных угроз в четвертом столбце выросло по причине отсутствия сетевых подключений к общедоступным сетям передачи. Однако количество исключенных угроз в пятом столбце сократилось по причине более высокого потенциала нарушителя.

Нулевой результат в третьем столбце для всех объектов информатизации означает, что для них необходимо обеспечить конфиденциальность, доступность и целостность обрабатываемой информации. В случае если для некоторой системы не требуется обеспечение конфиденциальности, количе-

ство угроз, исключенных из рассмотрения на этом этапе, перестанет быть нулевым. В частности, такой вариант возможен при необходимости защиты объекта информатизации с общедоступной информацией.

При использовании разработанной базы знаний среднее время оценки актуальности угроз по каждому из пяти указанных объектов информатизации составило 3,5 ч рабочего времени. Указанное время не включает в себя трудозатраты на составление описания объекта информатизации и оформление документации. Аналогичная работа по оценке угроз для других объектов информатизации с использованием непосредственного вывода табличного варианта БДУ ФСТЭК России ранее занимала у того же специалиста не менее 5 ч рабочего времени.

Стоит отметить, что указанное время оценки актуальности угроз достигнуто для базы знаний, представленной без графического интерфейса (исключительно в формате текстового файла). Представление базы знаний в графическом интерфейсе с использованием алгоритма принятия решения способно сократить время еще больше.

Заключение

ЭС могут решать сложные задачи в узкой предметной области «прозрачно», позволяя логически обосновать принятое решение. Задачи более широкой предметной области для экспертных систем недоступны, в них требуется применение более современных технологий искусственного интеллекта (ИНС). Однако при использовании ИНС становятся актуальными проблемы юридического характера.

Разработанная база знаний ЭС позволила специалисту по защите информации произвести исключение неактуальных угроз безопасности без использования БДУ ФСТЭК России. Для повышения эффективности требуется разработка машины логического вывода, которая будет автоматически делать экспертные выводы из базы знаний на основе фактов.

Экспертом отмечено снижение времени, требуемого на исключение неактуальных угроз. Причина снижения времени состоит в более ёмком представлении знаний по сравнению со стандартным выводом табличного файла из БДУ ФСТЭК России.

Взаимодействие эксперта с базой знаний в интерфейсе текстового редактора негативно влияет на эффективность работы. Требуется более удобный интерфейс для взаимодействия эксперта и знаний.

База знаний ЭС позволила эксперту получить одинаковый результат для аналогичных объектов информатизации. Это подтверждает постоянство выходных данных ЭС в зависимости от входных данных. Разница в выходных результатах при апробации для различающихся объектов информатизации доступна для понимания и объяснима.

При необходимости разработанную базу знаний ЭС можно гибко изменять (добавлять, модифицировать или удалять знания об угрозах).

Дальнейшими вопросами, требующими проработки, являются разработка и внедрение автоматического алгоритма принятия решений, а также разработка графического интерфейса взаимодействия с пользователем.

Литература

1. Конев А.А. Подход к построению модели угроз защищаемой информации // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1-2 (25). – С. 34–39.
2. Методика оценки угроз безопасности информации. Методический документ ФСТЭК России от 05.02.2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/component/attachments/download/2919>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
3. ГОСТ Р 53114–2008. Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения. Дата введения 01.10.2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200075565>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
4. Милько Д.С. Экспертная система оценки угроз безопасности информации. Формальное представление объектов воздействия / Д.С. Милько, П.Н. Наседкин // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021. – № 2 (12) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/212-2021>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
5. Технологии искусственного интеллекта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arg.moscow/content/data/6/11%20Технологии%20искусственного%20интеллекта.pdf>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
6. Джарратано Дж. Экспертные системы: принципы разработки и программирование / Дж. Джарратано, Г. Райли. – М.: ИД «Вильямс», 2007. – 1152 с.
7. Банк данных угроз ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bdu.fstec.ru>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
8. Искусственный интеллект в ВПК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Искусственный_интеллект_в_ВПК, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
9. Artificial Intelligence for Cyber-Security: A Double-Edge Sword [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://medium.com/sciforce/artificial-intelligence-for-cyber-security-a-double-edge-sword-6724e7a31425>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
10. Центр компетенций НТИ по направлению «Искусственный интеллект» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nti2035.ru/technology/competence_centers/mipt.php, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
11. Уголовный кодекс РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102041891>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
12. Кодекс РФ об административных правонарушениях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102074277>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
13. Федеральный закон от 08.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102108264>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
14. Джексон П. Введение в экспертные системы / П. Джексон. – М.: ИД «Вильямс», 2001. – 623 с.
15. Профессиональный стандарт Специалист по защите информации в автоматизированных системах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/reestr-professionalnykh-standartov/index.php?ELEMENT_ID=60419, свободный (дата обращения: 03.12.2021).
16. Профессиональный стандарт. Специалист по защите информации в телекоммуникационных системах и

сетях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/reestr-professionalnykh-standartov/index.php?ELEMENT_ID=62853, свободный (дата обращения: 03.12.2021).

17. Реестр профессиональных стандартов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://profstandart.rosmintrud.ru>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).

18. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201612060002>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).

19. Царегородцев А.В. Влияние информационного общества на подготовку обучающихся в сфере информационной безопасности / А.В. Царегородцев, Е.П. Цацкина // Вестник Моск. гос. лингв. ун-та. Образование и педагогические науки. – 2019. – № 4(833) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-informatsionnogo-obschestva-na-podgotovku-obuchayushchih-v-sfere-informatsionnoy-bezopasnosti>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).

20. Азаров В.Н. Некоторые проблемы инженерной подготовки в области информационных технологий и пути их решения / В.Н. Азаров, Ю.И. Гудков // Вестник ИрГТУ (Иркутск). – 2015. – № 3 (98) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-problemy-inzhenernoy-podgotovki-v-oblasti-informatsionnyh-tehnologiy-i-puti-ih-resheniya>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).

21. Малюк А.А. Кадровое обеспечение информационной безопасности // Государственная служба (Москва). – 2011. – № 5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kadrovoye-obespechenie-informatsionnoy-bezopasnosti>, свободный (дата обращения: 03.12.2021).

Милько Дмитрий Сергеевич

Аспирант каф. «Информационные системы и защита информации» (ИСИЗИ) Иркутского государственного ун-та путей сообщения (ИрГУПС)

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, Россия, 664074

Тел.: +7 (395-2) 638-359

ORCID: 0000-0002-6259-6749

Эл. почта: dmitry.s.milko@gmail.com

Данеев Алексей Васильевич

Д-р техн. наук, проф. каф. ИСИЗИ ИрГУПС

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, Россия, 664074

ORCID: 0000-0003-4288-824X

Тел.: +7 (395-2) 638-359

Эл. почта: daneev@mail.ru

Горбылев Александр Леонидович

Аспирант Иркутского национального исследовательского технического ун-та (ИрНИТУ)

Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, Россия, 664074

Тел.: +7 (395-2) 405-510

Эл. почта: gal@irksecret.ru

Milko D.S., Daneev A.V., Gorbylev A.L.

Knowledge base of the expert system for cyber security threat modeling

The appraisal of cyber security threats is necessary to create of the cyber security threat model. The results of appraisal shall

apply for choosing information security measures. In February 2021, the new methodical document issued by the Russian Federal Service for export control of engineering technologies has gone into effect, and is obligatory to follow by all organizations.

The paper presents the approach to ensure the automation of irrelevant cyber security threats ejection. The automation is done by developing the expert system. The knowledge base of expert system is created, and the methodology for its creating is described in the paper. The key terms for the expert system are worded. The flow chart of expert system is shown. The experimental results of knowledge base launching in manual mode are given.

A part of the paper is devoted to a justification for choosing the expert system as an automatization method. The expert systems are compared to a «smarter» artificial intelligence method (artificial neural networks).

As a result, the conclusions about efficiency of produced knowledge base are provided and the necessity of creating a more user-friendly interface and rule engine is made evident.

Keywords: cyber security threats, cyber security threats model, expert system, knowledge base, threat database.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-61-69

References

1. Konev A.A. [Approach to creation protected information model]. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 1-2 (25), P. 34–39 (in Russ.).
2. [Methodology for assessing cyber security threats]. FSTEC of Russia Methodical document (in Russ.). Available at: <https://fstec.ru/component/attachments/download/2919>, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
3. [GOST R 53114-2008. Information security. Ensuring information security in the organization. Basic terms and definitions]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200075565>, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
4. Milko D.S., Nasedkin P.N. [Threat modeling expert system. Formal representation of impact objects]. *Young Science of Siberia: Electronic Scientific Journal*, 2021, no. 2 (12). Available at: <http://mnv.irkgups.ru/toma/212-2021>, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
5. [Artificial intellect technologies] (in Russ.). Available at: <https://apr.moscow/content/data/6/11/%20Технологии%20искусственного%20интеллекта.pdf>, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
6. Giarratano Joseph C., Riley Gary D. *Expert Systems. Principles and Programming*. Moscow, Williams Publ., 2007, 1152 p. (in Russ.).
7. [FSTEC of Russia Threats Database]. Available at: <https://bdu.fstec.ru>, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
8. [Artificial Intellect in Defence]. Available at: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Искусственный_интеллект_в_ВПК, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
9. Artificial Intelligence for Cyber-Security: A Double-Edge Sword. Available at: <https://medium.com/sciforce/artificial-intelligence-for-cyber-security-a-double-edge-sword-6724e7a31425>, free (Accessed: December 3, 2021).
10. [«Artificial Intelligence» NTI Competence Center]. Available at: https://nti2035.ru/technology/competence_centers/mipt.php, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
11. [Criminal Code of Russia]. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102041891>, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
12. [Administrative Violations Code of Russia]. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102074277>, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
13. [Federal Law No. 149 of 8 July 2006 on the Information, Information Technologies and Information Security]. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102108264>, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
14. Jackson Peter. *Introduction to Expert Systems*. Moscow, Williams Publ., 2001. 623 p. (in Russ.).
15. [Professional Standard. Information Security Specialist in Automated Systems]. Available at: https://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/reestr-professionalnykh-standartov/index.php?ELEMENT_ID=60419, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
16. [Professional Standard. Information Security Specialist in Telecommunication Systems and Networks]. Available at: https://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/reestr-professionalnykh-standartov/index.php?ELEMENT_ID=62853, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
17. [Registry of occupational standards]. Available at: <https://profstandart.rosmintrud.ru>, free (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
18. [Information Security Doxy of Russia]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201612060002>, free. (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
19. Tsaregorodcev A.V., Tsatskina E.P. [The impact of the information society on the training of information security students]. *Bulletin of the Moscow State Linguistic University. Education and Pedagogical Sciences*, 2019, no. 4 (833). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-informatsionnogo-obschestva-na-podgotovku-obuchayuschihysya-vsphere-informatsionnoy-bezopasnosti>, free. (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
20. Azarov A.N., Gudkov Yu.I. [Some problems of engineering training in the field of information technology and ways to solve them]. *Bulletin of ISTU (Irkutsk)*, 2015, no. 3 (98). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-problemy-inzhenernoy-podgotovki-v-oblasti-informatsionnyh-tehnologiy-i-puti-ih-resheniya>, free. (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).
21. Malyuk A.A. [Information security staffing]. *Public Service (Moscow)*, 2011, no. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kadrovoe-obespechenie-informatsionnoy-bezopasnosti>, free. (Accessed: December 3, 2021) (in Russ.).

Dmitry S. Milko

Postgraduate student, Department of Information Systems and Information Security (ISIS), Irkutsk State Transport University (ISTU) 15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, Russia, 664074
ORCID: 0000-0002-6259-6749
Phone: +7 (395-2) 63-83-59
Email: dmitry.s.milko@gmail.com

Alexey V. Daneev

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department of ISIS, ISTU 15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, Russia, 664074
ORCID: 0000-0003-4288-824X
Phone: +7 (395-2) 63-83-59
Email: daneev@mail.ru

Alexander L. Gorbylev

Postgraduate student, Irkutsk National Research Technical University 83, Lermontova st., Irkutsk, Russia, 664074
Phone: +7 (395-2) 40-55-10
Email: gal@irksecret.ru

УДК 004.415.2

А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов

Метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера на основе аппаратного подсчета контрольной суммы

Разработан метод выявления ошибок в памяти микроконтроллера (МК), необходимый при исследованиях и испытаниях на помехоустойчивость МК. В основу метода заложена работа аппаратного блока хеш-функции для подсчета контрольной суммы (КС) полезных данных. На основе метода предложен способ исправления ошибочных битов памяти различных вычислительных устройств. Способ включает алгоритм детектирования и исправления ошибок, позволяющий восстанавливать данные в памяти посредством вычисления их КС с организацией хранения данных в виде структуры. Предложенный метод позволяет распознать, в каком объекте произошла ошибка, и восстановить ошибочные биты памяти. Реализация алгоритма проверки данных в виде системного процесса операционной системы реального времени позволила автоматизировать процесс поиска ошибок в фоновом режиме и определить причину возникновения сбоя. Программная реализация метода детектирования и исправления ошибок, без изменений аппаратной части, может быть применена при эксплуатации радиоэлектронных средств в сложных условиях, содержащих любое вычислительное устройство.

Ключевые слова: ЭМС, РЭС, микроконтроллер, битовая ошибка, хеш-сумма, контрольная сумма.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-70-78

Современные микроконтроллеры (МК) содержат различные виды памяти, например такие, как постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и пр. [1]. Воздействие внешних электромагнитных помех может привести к изменению данных, которые содержат эти устройства. Так, повышенная восприимчивость к электромагнитным помехам может привести к неконтролируемому переключению транзисторов в регистрах памяти [2, 3]. Вследствие этого возникают битовые ошибки, которые следует выявлять и своевременно устранять для стабильной работы радиоэлектронного средства (РЭС). Для выявления и исправления ошибок в памяти применяют аппаратные [4–8] и программные средства, основанные на битах четности, специализированных кодах исправления ошибок [9, 10], а также различных модификациях классических алгоритмов кода Грея, Рида–Соломона [11], Хэмминга, турбокодов [12–14] и пр. Последние необходимы для распознавания и исправления битовой ошибки в двух и более битах данных памяти. Однако классические алгоритмы неполностью справляются с коррекцией ошибок и не способны определить адрес памяти, в которой произошёл сбой [15]. Кроме того, они представляют собой ресурсоемкие алгоритмы, что сказывается на производительности и скорости отклика РЭС в целом. Современные МК обладают большим объемом ОЗУ и ПЗУ. В случае физического разрушения логических элементов (вентилей транзистора) невозможно локализовать поврежденную страницу в памяти, используя классические алгоритмы. Тем самым в случае выявления ошибки невозможно определить, какие данные можно использовать, а какие повреждены. Таким образом, существует потребность в новых методах диагностики памяти МК, способных эффективно найти и исправить ошибки.

В настоящее время при проверке целостности данных часто используют контрольную сумму (КС). Это делают по нескольким причинам. Во-первых, простота реализации алгоритма проверки КС не требует использования сложных и затратных вычислительных алгоритмов [16, 17], а также специализированных внешних библиотек. Во-вторых, многие МК имеют аппаратный блок подсчета КС (SHA, CRC, MD5 и др.), что позволяет снизить объем программного кода и получить результат за 1–3 системных такта (в зависимости от объема памяти, метода вычисления КС и аппаратных возможностей МК). В-третьих, в большинстве современных МК реализован аппаратный блок прямого доступа к памяти (ПДП), что позволяет обращаться к данным в памяти в обход ядра МК, повышая скорость обработки и проверки данных на наличие ошибок и снижая расходы вычислительных ресурсов МК. Использование КС при проверке данных в памяти обладает рядом преимуществ, позволяющих локализовать область памяти, содержащей ошибки, и исправить их. Таким образом, целесообразна разработка новых методов, позволяющих на основе КС выявлять и исправлять ошибки в памяти при эксплуатации МК в сложных условиях, в том числе при внешних климатических и электромагнитных воздействиях.

Цель работы – разработать метод выявления и исправления ошибок памяти МК на основе аппаратного подсчета КС для надежного их хранения.

Проверка состояния регистров МК

С целью обеспечения покрытия тестами большинства блоков МК и выявления наиболее уязвимых и восприимчивых к внешнему воздействию блоков МК, которые могут быть подвержены ошибкам, а также для определения источника или причины их возникновения разработан комплекс тестовых задач. Выбранные для тестирования блоки МК

используются в большинстве современных РЭС (табл. 1).

Таблица 1

Тестируемые блоки МК и описание тестовых задач	
Блок МК	Описание тестовой задачи
АЛУ	Циклическое выполнение арифметических операций
Область памяти (ПЗУ, ОЗУ, ЭСППЗУ)	1. Выполнение операций записи в память с последующим чтением и проверкой записанных данных. 2. Выполнение подсчета КС данных во всей области памяти
Таймеры	1. Выполнение прямого и обратного счета таймерами. 2. Работа таймеров в режиме ШИМ. 3. Работа таймеров с использованием прерываний. 4. Использование системного таймера SysTick для выполнения задач с определенной периодичностью
Интерфейсы передачи данных	1. Прием и передача данных по интерфейсу UART с проверкой данных посредством вычисления КС. 2. Прием и передача данных по интерфейсу I ² C с проверкой данных посредством вычисления КС
АЦП	Проверка корректности функционирования АЦП посредством чтения аналогового сигнала регулярных и инжекторных каналов.
ЦАП	Генерация аналогового сигнала и его проверка на корректность
ПДП	Использование инструментов прямого доступа к памяти для организации передачи данных по UART, SPI, I ² C и др. в обход центрального процессора или АЛУ МК
Порты ввода-вывода	Изменение состояний выводов МК по набору заранее сформированных тестовых масок для 8-, 16-, 32-битных портов. Контроль соответствия заданному состоянию регистров тестируемого порта ввода-вывода МК. Циклическое выполнение битовых операций над числами: сдвиг вправо, сдвиг влево, чтение и запись бита
Прерывания	Контроль выполнения прерываний в блоках МК, а также мониторинг выполнения соответствующих функций прерывания

Признаком нарушения работы МК являются неконтролируемые и непредвиденные изменения в процессе тестирования. В процессе работы отслеживаются следующие параметры: время выполнения кода; амплитуда воздействующей электромагнитной помехи; состояние выводов общего назначения (GPIO); работа сторожевого таймера (DWT, контроль зависания ядра МК); частота тактирования ядра МК, КС всей памяти и отдельно каждого в ней объекта. Полученные данные во многом зависят от задействованных библиотек, версии компилятора, а также использования ключей оптимизации кода, операций с плавающей точкой и работы блока ПДП.

Измерительная печатная плата (ПП), соответствующая нормативным документам [18, 19] по измерению излучаемых эмиссий и устойчивости к излучению интегральной схемы в ТЕМ-камере, представлена на рис. 1.

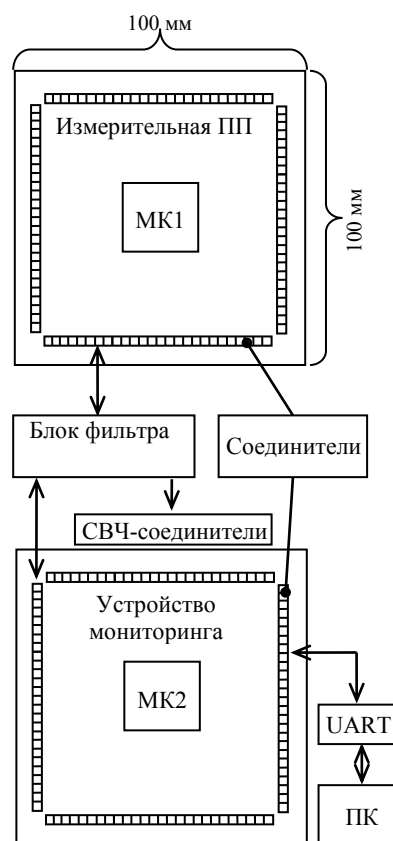


Рис. 1. Схема соединения устройства мониторинга и измерительной ПП

На одной стороне ПП находится измеряемый МК, а все необходимые компоненты, включая различные соединители для питания и программатора, расположены на обратной стороне ПП.

Необходимые компоненты для контроля параметров МК1 располагаются на устройстве мониторинга, которое содержит МК2 для контроля работы алгоритмов и записи данных с результатами тестов. Измерение состоит из 3 этапов:

1. Мониторинг параметров выполнения тестовых задач, задействующих исследуемые блоки МК, без внешнего воздействия. Это необходимо, чтобы получить эталонные значения параметров, по которым будет выполняться сравнение (до и после воздействия на МК).

2. Выполнение тестовых задач с внешними климатическим и электромагнитным воздействиями. Оно осуществляется МК2, расположенным на устройстве мониторинга. Он в режиме реального времени фиксирует состояние исследуемого МК1, расположенного на измерительной ПП. Фиксация состояний происходит посредством соответствующего интерфейса передачи данных. Принятые МК2 данные передаются на ПК для обработки и анализа результатов.

3. Процесс обработки полученных данных. Сравниваются результаты работы тестовых блоков МК первого и второго этапов. Фиксируются отклонения в результате климатического и электромагнитного воздействий на исследуемый МК1.

Метод выявления и исправления ошибок в энергонезависимой памяти МК

Предложенный метод заключается в проверке корректности данных в ПЗУ МК с использованием КС объектов в ПЗУ, одним из доступных способов для вычислительной системы целевого устройства. Метод использует следующие данные: полезные данные; КС ПЗУ МК; КС данных; объект структуры; резервная копия объекта структуры; служебная структура/дескриптор. Поясним каждый вид.

К *полезным данным* относится информация, которая длительное время хранится в ПЗУ и используется в процессе работы РЭС, например, калибровочные коэффициенты; параметры режима работы; результаты работы РЭС; диагностическая информация и т.д.

КС данных вычисляется одним из аппаратных блоков МК для вычисления КС (SHA, CRC, MD5 и др.).

Объект структуры является составным типом данных (рис. 2), предназначенным для хранения полезных данных и их КС в полях структуры.

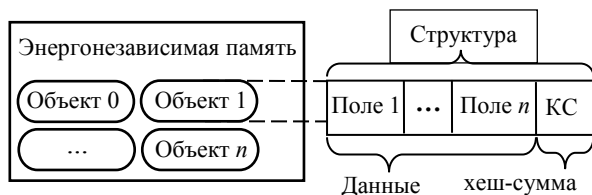


Рис. 2. Хранение объекта структуры с данными в энергонезависимой памяти

Резервная копия объекта структуры представляет собой копию исходной структуры, служащую для восстановления данных в случае повреждения информации в ПЗУ.

КС ПЗУ МК вычисляется одним из аппаратных блоков МК для вычисления хеш-суммы всей информации, находящейся в ПЗУ МК, после окончания формирования всех объектов структур и подсчета их КС. КС энергонезависимой памяти МК обновляется каждый раз при выполнении операции записи в память либо при изменении данных в ПЗУ. Она находится в поле служебной структуры и является эталоном (контрольным значением) в процессе сравнения с вычисленной КС ПЗУ.

Служебная структура содержит информацию обо всех объектах структур с данными: название структуры; адрес в памяти; количество выявленных ошибок; количество успешных восстановлений; количество исправленных битов; количество выполненных циклов чтения/записи. При каждом изменении данных в ПЗУ информация в служебной структуре обновляется. Таким образом, она содержит актуальную информацию об изменениях и состоянии данных в ПЗУ.

Предложенный метод предусматривает различные варианты реализации в зависимости от решаемой задачи, что влияет на организацию связей между данными, представленными выше. В общем виде метод состоит из этапов, представленных в обобщенном алгоритме на рис. 3.

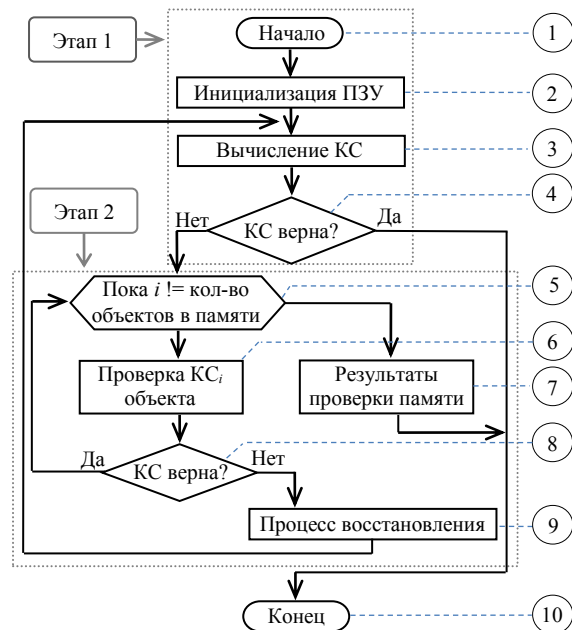


Рис. 3. Обобщенный алгоритм выявления и исправления ошибок данных в ПЗУ

В основу алгоритма проверки памяти заложен метод избыточного кодирования для вычисления КС. Данный способ кодирования отличается простотой реализации за счет наличия блоков в МК и обладает гибкостью расчета (длины результата) при выборе конечной архитектуры расчёта КС с возможным применением для МК с 8-, 16-, 32- и 64-битной вычислительной архитектурой. Обобщенный алгоритм поиска и исправления ошибок в ПЗУ представлен на рис. 3. Работа алгоритма состоит из двух этапов.

На этапе 1 выполняется вычисление текущей КС ПЗУ и её сравнение с эталонным значением КС энергонезависимой памяти МК, находящейся в служебной структуре. Если оба значения КС идентичны, проверка заканчивается. В противном случае алгоритм переходит ко второму этапу проверки данных в ПЗУ.

Этап 2 заключается в поиске ошибок КС в объектах структур, находящихся в ПЗУ и их резервных копиях. Информация о них берется из служебной структуры.

Проверка блоков памяти выполняется посредством подсчета КС каждого объекта памяти (рис. 2). При достижении последнего блока значение КС сравнивается с эталонным. Если вычисленное и эталонное значения КС различаются, запускается процесс восстановления памяти. Возможен вариант, при котором КС всей памяти будет отличаться от эталонной, но ни в одном объекте не будут найдены

ошибки. Это означает, что изменения коснулись свободных ячеек памяти, которые в данный момент не используются.

Процесс проверки данных в ПЗУ в случае аппаратного либо программного сбоя в результате воздействия ЭМП состоит из 5 этапов, реализованных в обобщенном алгоритме:

1. Формирование объектов структур данных, включая запись их КС в служебное поле структуры.
2. Подсчет КС всего ПЗУ и выполнение циклической проверки КС.
3. Выявление ошибки КС всего ПЗУ и проверка всех объектов с целью локализации адреса объекта в ПЗУ, в котором возник сбой.
4. Восстановление данных поврежденного объекта из резервной копии посредством исправления битов ПЗУ, содержащих ошибку.
5. Повторная проверка КС всего ПЗУ с целью подтверждения исправления ошибок.

Поля структуры содержат данные, а их КС находится в служебном поле структуры. Затем выполняется дублирование созданной структуры (резервная копия), которая используется в случае повреждения данных. После того, как все данные помещены в структуры и созданы резервные копии, вычисляется КС всей энергонезависимой памяти, она хранится в служебной структуре либо дескрипторе вместе с информацией о количестве структур и их физических адресах в памяти. КС всей памяти – это эталонное значение, с которым будет сравниваться вычисленное значение КС памяти в процессе проверки. Оно позволит достаточно быстро определить наличие ошибок памяти, поскольку в случае изменения хотя бы одного бита тестируемой памяти гарантированно изменится и КС.

В случае несовпадения вычисленной КС с известным эталонным значением КС, полученным на этапе изменения данных в памяти, вызывается процесс проверки КС данных, хранящихся в структурах. В случае обнаружения несовпадения КС в одной или более структур выполняется сверка КС данных со значением, записанным в поле структуры, а также со значением КС резервной копии (данных и КС в служебном поле структуры). В результате этот объект имеет корректную КС данных, и она совпадает со значением КС в служебном поле структуры, эти данные считаются корректными и используются в качестве маски для сверки битов в памяти поврежденной структуры. Отличающиеся биты в поврежденной структуре будут изменены. Затем выполняется повторное вычисление КС всей памяти. В том случае, если ошибка была только в одной структуре, вычисленная КС совпадет с эталонным значением КС в служебной структуре/дескрипторе.

При формировании полей структуры рекомендуется использовать выравнивание данных для экономии памяти. Структуры могут хранить данные различного объема. При этом рекомендуется ограничить максимальный размер структуры 10% памяти для оптимизации процесса вычисления КС и

снижения вероятности появления большого количества ошибок в одной структуре. Обобщенный алгоритм может применяться как для распознавания, так и для исправления ошибок памяти.

Реализация метода без возможности восстановления данных

Информация хранится в памяти, используя объекты в виде структуры (рис. 4). Поля структуры могут содержать информацию различного типа. В одном из полей структуры может находиться вычисленный результат КС данных. Тем самым обеспечивается возможность проверки данных в структуре и сравнение с полем, в котором находится «эталонный» результат, который вычисляется каждый раз при записи данных в структуру.

```
struct_eeprom_data{
    float param_1;
    float param_2;
    int param_3;
    char name_object1[44];
    char name_object2[45];
    char name_object3[45];
    uint16_treg = 0;
    uint32_tcrc = 0;
};
```

Рис. 4. Структура для хранения тестовых данных

В память записывается информация в виде структуры, которая содержит поля для данных и поле для хранения КС. Оно будет гарантировать целостность данных в случае сбоя или неконтролируемого сброса системы. В процессе запуска устройства вычисляется КС всей памяти. В случае, когда текущее вычисленное значение КС отличается от ранее вычисленного, регистрируется сбой в памяти и выполняется проверка всех данных, находящихся в энергонезависимой памяти МК. Если данные во всех структурах совпадут с соответствующими КС, то это означает, что сбой в памяти не повредил данные, а изменения коснулись адресов свободной памяти. Если ячейка памяти не повреждена (физически), то данный вид ошибок поддается восстановлению путем сброса всех разрядов неиспользуемой памяти. В результате данной операции повторный подсчет КС всей памяти будет совпадать с вычисленным ранее значением. В случае повреждения ячейки памяти требуется исключить операции с поврежденным блоком памяти, пометив данный блок в «карте памяти» ОСРВ и обновив данные КС.

Способ реализации метода с возможностью восстановления данных

На рис. 5 представлено программное разделение ПЗУ на 2 раздела и расположение в нем исходных структур с данными (S_1, S_2, S_3) и их резервных копий (CS_1, CS_2, CS_3). В каждом разделе имеется свой дескриптор сегмента (DS), он выполняет функцию служебной структуры, содержащей информацию о количестве сегментов памяти, количестве структур, их адреса и КС. Благодаря использованию зеркалирования данных (двусторонняя синхронизация данных в памяти МК) предоставляется возмож-

ность восстановить информацию в том случае, если повреждения не затронули области памяти резервного и резервируемого разделов памяти. В таком случае анализируется информация *DS* каждого раздела и сравнивается с данными их структур. Объекты, у которых вычисленная КС не совпадает с данными в поле КС структуры объекта, инвертируются (биты, в которых выявлены несоответствия). Таким образом, сохраняется ресурс чтения/записи в ячейки памяти (он имеет ограниченное количество циклов чтения/записи).

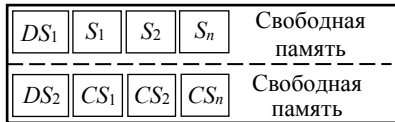


Рис. 5. Дублирование данных в общей памяти

В табл. 2 представлены все комбинации возможных вариантов ошибок в памяти с использованием зеркалирования данных. Например, вариант 1 сообщает о повреждениях, затронувших «Данные объекта *n*» (*A*). Вариант 2 сообщает о повреждениях, затронувших «Данные объекта» (*A*) и «CRC объекта» (*B*) и т.д., аналогичным образом представлены все остальные варианты ошибок. Среди них следует выделить критические комбинации вариантов ошибок, при которых отсутствует возможность восстановления данных, к ним относятся ошибки, возникшие в трех и более областях памяти (данные объекта (*A*), CRC объекта (*B*), копия данных объекта (*C*), CRC копии данных объекта (*D*)), что не исключает повреждения данных в другом блоке памяти. Для проверки целостности всей памяти предлагается снимать дампы («слепок») всей памяти и хранить результат в отдельной структуре. Данный способ проверки позволяет выполнить проверку всех данных в памяти, значительно сократив время проверки в сравнении с проверкой группы

отдельных наборов данных. Серьезным недостатком способа является необходимость пересчета КС при изменении данных в каком-либо блоке памяти.

Таблица 2

Комбинации вариантов выявления ошибок в памяти

Ошибка	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
<i>A</i>	1	2	3	4
<i>B</i>	–	6	7	8
<i>C</i>	–	–	11	12
<i>D</i>	–	–	–	16

Способ реализации метода в составе операционной системы реального времени

Возможности различных вычислительных модулей в настоящее время позволяют запускать программный код под управлением ОСРВ, что в значительной степени упрощает процесс разработки конечного устройства. ОСРВ способна контролировать все служебные процессы и пользовательские задачи, регистрировать ошибки, используя режим псевдомногозадачности. Системная «Служба диагностики» с инструментами восстановления данных совместно с «Менеджером памяти» может контролировать целостность памяти, выполняя проверку памяти в фоновом режиме. Большинство ОСРВ распространяются в открытом доступе, предоставляя возможность внедрения стороннего кода в состав ОСРВ. Таким образом, использование в ОСРВ предложенного способа диагностики и восстановления памяти позволит автоматизировать процесс. Посредством аппаратного блока ПДП менеджер памяти может обращаться к данным в памяти в обход центрального процессора вычислительного устройства, что позволит избежать дополнительной нагрузки за счет периодического обращения к памяти ОСРВ.

Процесс контроля состояния и целостности объектов в памяти выполняет служба ОСРВ «Менеджер памяти» (рис. 6). Виртуальный дескриптор выполняет контроль за доступом к объектам в памяти.

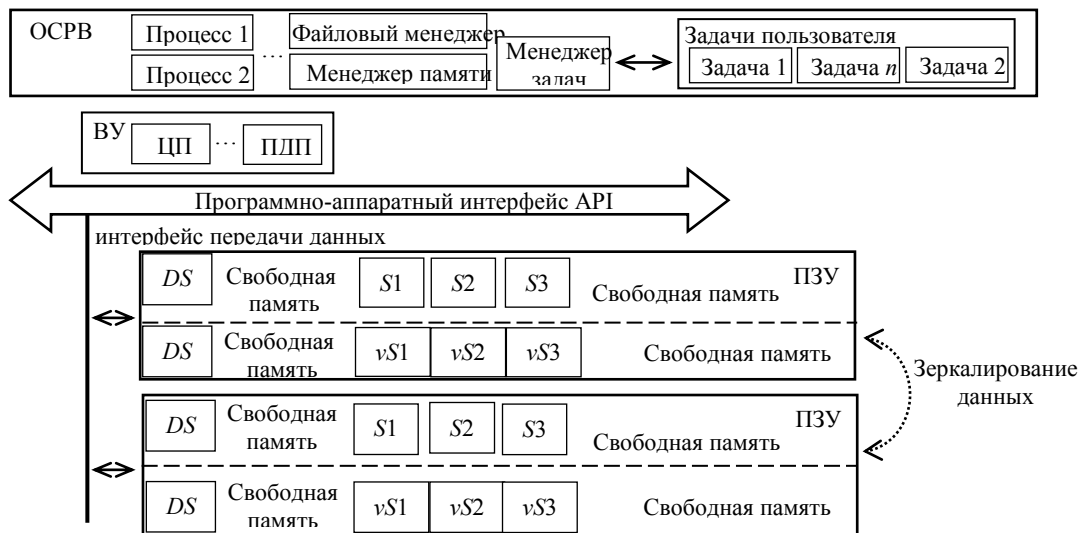


Рис. 6. Организация контроля целостности памяти средствами «Менеджера памяти» ОСРВ

Таким образом, исключается проблема множественного доступа к данным в памяти. Менеджер

памяти предоставляет доступ к памяти активным процессам и содержит информацию о количестве

объектов в памяти, их адресах и КС всей памяти. В случае сброса ОСРВ проверяет целостность данных посредством службы «Менеджера памяти», функционирующего в фоновом режиме.

Тестирование алгоритма и апробация метода мониторинга и восстановления данных в памяти

Разработан программный код и выполнено тестирование разработанного метода выявления и исправления ошибок в энергонезависимой памяти МК ATmega2560 в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 3. На рис. 7 представлена структура данных, используемая в тестовой программе. Для хранения тестовых данных в структуре `eeprom_data` предусмотрены поля: `param_1`, `param_2`, `param_3`, `name_object1`, `name_object2` и `name_object3`.

```
struct eeprom_data{
    float param_1 = 1.1984;
    float param_2 = 2.451;
    int param_3 = 8035;
    char name_object1[44];
    char name_object2[45];
    char name_object3[45];
    uint16_t reg = 0;
    uint32_t crc = 0;
};
```

Рис. 7. Структура для хранения тестовых данных

Результат работы тестовой программы представлен в табл. 3. Необходимо отметить, что в МК ATmega2560 отсутствует аппаратный блок вычисления КС. Для расчета КС использовался метод циклического избыточного кода.

Таблица 3

Результаты работы программы выявления ошибок в ПЗУ

Сообщения тестовой программы	Описание этапа работы
Clear EEPROM (CRC): 7DCF4209 CRC Obj1 = FB41D96C CRC Obj2 = 236B8F9B CRC Obj3 = 2365DD94	Шаг 1. Вычисление КС методом циклического избыточного кода (CRC) всей ЭСПЗУ МК и трёх структур с тестовыми данными
After write three structures to EEPROM (CRC): CB227FA0 11111111	Шаг 2. Вычисление КС всей памяти ЭСПЗУ после записи в неё трёх структур. Выводится случайно выбранная ячейка памяти из диапазона адресов, в которых расположены тестовые структуры данных
Error entered in byte #190 bit #7 New state bit #0 01111111	Шаг 3. В выбранную случайным образом ячейку памяти №190 вносится ошибка в бит 7
ERROR CRC EEPROM! ERROR EEPROM CRC IN OBJECT # 1	Шаг 4. Алгоритм распознал изменение КС данных в памяти и выявил ошибку в КС объекта 1
EEPROM (CRC): 7DCF4209 CRC Obj1 = FB41D96C CRC Obj2 = 236B8F9B CRC Obj3 = 2365DD94	Шаг 5. Восстановление ошибочного бита объекта 1, в котором была выявлена ошибка. После успешного восстановления отображается информация с КС всей памяти и объектов, хранящихся в ней

Поле «reg» предназначено для хранения состояния регистра порта общего назначения. Данная задача представлена ранее в табл. 1, в которой приведены тестовые задачи. Поле «crc» предназначено для хранения КС данных в структуре.

В отечественных МК 1986BE9х имеется блок батарейного домена, в котором доступны 14 32-разрядных регистров, в которых рекомендуется хранить долговременные данные. Функция записи данных в регистрах батарейного домена представлена на рис. 8.

```
void SaveStruct (void) {
    eeprom_data object1, object2, object3;
    BKP_RTC_WaitForUpdate ();
    MDR_BKP->REG_02 = object1;
    MDR_BKP->REG_03 = object2;
    MDR_BKP->REG_04 = object3;
}
```

Рис. 8. Функция записи данных в регистры батарейного домена МК 1986BE91T

В основе отечественных МК серии 1986BE9х используется ядро ARM Cortex-M3. В качестве ближайшего аналога отечественного МК в технической документации указан МК STM32F103. Данный МК обладает тем же ядром Cortex-M3, в котором реали-

зован аппаратный блок CRC для подсчета КС. Таким образом, представленный метод выявления и исправления ошибок в памяти МК может применяться как в отечественных, так и зарубежных МК.

Заключение

Представленный метод выявления и исправления ошибок в памяти МК может применяться как в отечественных, так и зарубежных МК и не требует использования дополнительных аппаратных компонентов. Также метод позволяет локализовать область повреждения данных в памяти и восстановить их в том случае, если ИС памяти не была повреждена. В противном случае поврежденные страницы памяти помечаются как неиспользуемые, затем резервные данные переносятся в свободные страницы памяти.

Предлагаемые метод и алгоритмы диагностики данных в памяти МК позволяют эффективно восстановить данные в случае появления множества битовых ошибок как во внешней, при использовании дополнительной микросхемы памяти, так и во внутренней памяти МК.

Таким образом, использование предложенного метода позволяет эффективно выявлять и исправлять ошибки в памяти при эксплуатации МК в сложных условиях, в т.ч. при внешних климатиче-

ских и электромагнитных воздействиях. Предложенный метод обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами:

1. В процессе работы используется аппаратный блок подсчёта, что позволяет снизить объем программного кода и получить результат за 1–3 системных такта, в зависимости от объема памяти, метода вычисления КС и аппаратных возможностей МК.

2. Реализация метода не требует использования сложных и затратных вычислительных функций, а также специализированных внешних библиотек.

3. Использование инструментов МК для организации прямого доступа к памяти позволяет обращаться к данным в памяти, минуя ядро МК, что позволяет повысить скорость проверки данных на наличие ошибок, снизив расходы вычислительных ресурсов МК.

4. Возможно выявлять и локализовать область памяти, содержащую ошибки, и исправить их посредством зеркалирования.

5. Использование зеркалирования данных позволяет сохранить данные в случае физического повреждения ИС памяти.

Внедрение предложенного метода восстановления контекста рабочего процесса МК средствами ОСРВ позволит повысить надежность и отказоустойчивость разрабатываемых устройств, содержащих МК, а также сократить время поиска неисправности в МК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту РНФ 19-79-10162.

Литература

1. Воздействие импульсных электромагнитных полей на микросхемы АЦП и ЦАП / Е.В. Григорьев, В.В. Старостенко, Е.П. Таран, Д.А. Унжаков // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – № 4. – С. 22–24.

2. Воздействие импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы памяти / Л.Н. Ахрамович, М.П. Грибский, Е.В. Григорьев, С.А. Зуев, В.В. Старостенко, Г.И. Чурюмов // Радиоэлектроника и информатика. – 2006. – № 4. – С. 15–17.

3. Яньков А.И. Методы обеспечения сбоеустойчивости к одиночным событиям в процессе проектирования для микропроцессоров K1830BE32УМ и 1830BE32У / А.И. Яньков, В.А. Смерек, В.П. Крюков, В.К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2012. – № 1. – С. 92–95.

4. FlashSim: A Simulator for NAND Flash-based Solid-State Drives / Y. Kim, B. Tauras, A. Gupta, B. Urganekar // In Proceedings of the First International Conference on Advances in System Simulation, Porto, Portugal, 20–25 September. – 2009. – P. 125–131.

5. Yang J. Novel ECC architecture enhances storage system reliability. In Proceedings of the Flash Memory Summit, Santa Clara, CA, USA, 22–24 August 2012. – P. 1–15.

6. Tanakamaru S. Over-10x-extended-lifetime 76%-reduced-error solid-state drives (SSDs) with error-prediction LDPC architecture and error-recovery scheme / S. Tanakamaru, Y. Yanagihara, K. Takeuchi // In Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, CA, USA, 19–23 February 2012. – P. 424–426.

7. Park D. Safe microcontrollers with error protection encoder-decoder using bit-inversion techniques for on-chip flash integrity verification / D. Park, T.G. Kim // In Proceedings of the 2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Tokyo, Japan, 1–4 October. – 2013. – P. 299–300.

8. Park J. VL-ECC: Variable Data-Length Error Correction Code for Embedded Memory in DSP Applications / J. Park, S. Bhunia // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2014. – Vol. 61, No. 2. – P. 120–124.

9. Газарян Ю.О. Об экспериментальной оценке стойкости метода случайного кодирования к атаке многократного наблюдения частичных кодовых векторов / Ю.О. Газарян, Ю.В. Косолапов // Вычислительные технологии. – 2015. – Т. 20, № 6. – С. 5–21.

10. Методы обеспечения стойкости микросхем к одиночным событиям при проектировании радиационно-стойких микросхем / В.Н. Ачкасов, В.А. Смерек, Д.М. Уткин, В.К. Зольников // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем // Сборник трудов / под общ. ред. А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2012. – С. 634–637.

11. Федоров С.В. Реализация потокового декодера укороченных кодов Рида–Соломона на ПЛИС / С.В. Федоров, В.И. Ромашкин, К.М. Вялых // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2016. – № 6. – С. 184–199.

12. Subhasri G. VLSI design of Parity check Code with Hamming Code for Error Detection and Correction / G. Subhasri, N. Radha // Proceedings of the 2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS), Madurai, India, 15–17 May. – 2019. – P. 15–20.

13. Назаров Л.Е. Характеристики помехоустойчивых укороченных блоковых турбокодов итеративного приема информации / Л.В. Назаров, П.В. Шишкин // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 323–328.

14. Осокин А.Н. Реализация турбокода на программируемой логической интегральной схеме / А.Н. Осокин, А.В. Ярёмченко // Векторы благополучия: экономика и социум. – 2011. – № 1 (1). – С. 382–387.

15. Теоретические основы цифровой радиосвязи: учеб. пособие / Н.И. Листопад, В.М. Козел, В.В. Дубровский, К.Л. Горбачев, К.А. Ковалев. – Минск: БГУИР, 2012. – 330 с.

16. Kim J. Low-Power Command Protection Using SHA-CRC Inversion-Based Scrambling Technique for CAN-Integrated Automotive Controllers / J. Kim, J. Cho, D. Park // In Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC), Kaohsiung, Taiwan. 10–13 December. – 2018. – P. 1–2.

17. Cho S. Robust Intra-Body Communication Using SHA1-CRC Inversion-Based Protection and Error Correction for Securing Electronic Authentication / S. Cho, D. Park // MDPI Sensors. – 2020. – P. 1–17.

18. IEC 62132-4-2006. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity 150 kHz to 1 GHz. – Part 4. Direct RF power injection method, 2006. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6510> (дата обращения: 05.03.2022).

19. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edition, 2005. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6185> (дата обращения: 05.03.2022).

Осинцев Артем Викторович

Ассистент каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного ун-та систем управления
и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-0888-6793
Тел.: +7-952-755-01-23
Эл. почта: kubenet@gmail.com

Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, с.н.с., доцент каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-6463-2889
Тел.: +7-952-888-38-96
Эл. почта: maxmek@mail.ru

Osintsev A.V., Komnatnov M.E.

A method for detecting and correcting errors in memory circuits based on the calculation of the hash sum Method to detect and correct errors in memory circuits based on the calculation of the hash sum

A method has been developed for detecting errors in the memory of a microcontroller (MC), which is necessary for research and testing for noise immunity of the MC. The method is based on the operation of the hash function hardware unit for calculating the checksum (CS) of useful data. Based on the method, an approach is proposed for correcting erroneous bits in the memory of various computing devices. The method includes an algorithm for detecting and correcting errors, which allows to restore data in memory by calculating their CS with the organization of data storage in the form of a structure. The proposed method enables helps to recognize the object where an error occurred and to recover the erroneous memory bits. The implementation of the data verification algorithm as a system process of the real-time operating system made it possible to automate the process of searching for errors in the background and determine the cause of the failure. The software implementation of the error detection and correction method, without changing the hardware, can be used in the operation of radioelectronic equipment in difficult conditions containing any computing device.

Keywords: EMC, radioelectronic equipment, microcontroller, bit error, hash, checksum.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-70-78

References

1. Grigoriev E.V. Starostenko V.V., Taran E.P., Unzhakov D.A. *Vozdeystviye impul'snykh elektromagnitnykh poley na mikrokhemy ATSP i TSAP* [Influence of pulsed electromagnetic fields on ADC and DAC microcircuits]. *Radioelectronics and Informatics*, 2007, no. 4, pp. 22–24 (in Russ.).
2. Akhramovich L.N., Gribsky M.P., Grigoriev E.V., Zuev S.A., Starostenko V.V., Churyumov G.I. *Vozdeystviye impul'snykh elektromagnitnykh poley na integral'nyye mikrokhemy pamyati* [Impact of pulsed electromagnetic fields on integrated memory circuits]. *Radioelectronics and Informatics*, 2006, no. 4, pp. 15–17 (in Russ.).
3. Yankov A.I. Smerek V.A., Kryukov V.P., Zolnikov V.K. *Metody obespecheniya sboyeustoychivosti k odinochnym sobytiyam v protsesse proyektirovaniya dlya mikroprotessorov K1830BE32UM i 1830VE32U* [Methods for ensuring fault tolerance to single events in the design process for microprocessors K1830BE32UM and 1830VE32U]. *Modeling of Systems and Processes*, 2012, no. 1, pp. 92–95 (in Russ.).

4. Kim Y., Tauras B., Gupta A., Urganekar B. *FlashSim: A Simulator for NAND Flash-based Solid-State Drives*. In *Proceedings of the First International Conference on Advances in System Simulation*, Porto, Portugal, 20–25 September. 2009, pp. 125–131.

5. Yang J. *Novel ECC architecture enhances storage system reliability*. In *Proceedings of the Flash Memory Summit*, Santa Clara, CA, USA, 22–24 August 2012, pp. 1–15.

6. Tanakamaru S., Yanagihara Y., Takeuchi K. *Over-10x-extended-lifetime 76%-reduced-error solid-state drives (SSDs) with error-prediction LDPC architecture and error-recovery scheme*. In *Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, San Francisco, CA, USA, 19–23 February 2012, pp. 424–426.

7. Park D., Kim T.G. *Safe microcontrollers with error protection encoder-decoder using bit-inversion techniques for on-chip flash integrity verification*. In *Proceedings of the 2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Tokyo, Japan, 1–4 October. 2013, pp. 299–300.

8. Park J., Bhunia S. *VL-ECC: Variable Data-Length Error Correction Code for Embedded Memory in DSP Applications*. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2014, vol. 61, no. 2, pp. 120–124.

9. Gazaryan Yu.O., Kosolapov Yu.V. *Ob eksperimental'noy otsenke stoykosti metoda sluchaynogo kodirovaniya k atake mnogokratnogo nablyudeniya chastichnykh kodovykh vektorov* [On the experimental assessment of the resistance of the random coding method to the attack of multiple observation of partial code vectors]. *Computational Technologies*, 2015, vol. 20, no. 6, pp. 5–21 (in Russ.).

10. Achkasov V.N. Smerek V.A., Utkin D.M., Zolnikov V.K. *Metody obespecheniya stoykosti mikrokhemy k odinochnym sobytiyam pri proyektirovani radiatsionno-stoykikh mikrokhemy* [Methods for ensuring the resistance of microcircuits to single events in the design of radiation-resistant microcircuits]. *Problems of Development of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems. 2012. Proceedings under the general. ed. of Academician of the Russian Academy of Sciences A.L. Stempkovsky*. Moscow, IPPM RAN, 2012, pp. 634–637 (in Russ.).

11. Fedorov S.V. Romashkin V.I., Vyalykh K.M. *Realizatsiya potokovogo dekodera ukorochennykh kodov Rida-Solomona na PLIS* [Implementation of a streaming decoder of shortened Reed-Solomon codes on FPGA]. *Engineering and Computer Technologies*. 2016, no. 6, pp. 184–199 (in Russ.).

12. Subhasri G. Radha N. *VLSI design of Parity check Code with Hamming Code for Error Detection and Correction*. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS)*, Madurai, India, 15–17 May. 2019, pp. 15–20.

13. Nazarov L.E., Shishkin P.V. *Kharakteristiki pomekhoustoychivyykh ukorochennykh blokovykh turbo-kodov iterativnogo priyema informatsii* [Characteristics of noise-immune shortened block turbo codes for iterative information reception]. *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 323–328 (in Russ.).

14. Osokin A.N., Yaremenko A.V. *Realizatsiya turbokodeka na programmiruyemoy logicheskoy integral'noy skheme* [Implementation of a turbo codec on a programmable logic integrated circuit]. *Vectors of Well-being: Economics and Society*, 2011, no. 1 (1), pp. 382–387 (in Russ.).

15. Listopad N.I. *Teoreticheskiye osnovy tsifrovoy radioosvyazi: ucheb. posobiye* [Theoretical foundations of digital radio communication]. Minsk, BSUIR, 2012, 330 p.

16. Kim J., Cho J., Park D. *Low-Power Command Protection Using SHA-CRC Inversion-Based Scrambling Technique for CAN-Integrated Automotive Controllers*. In *Pro-*

ceedings of the 2018 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC), Kaohsiung, Taiwan. December 10–13. 2018, pp. 1–2.

17. Cho S., Park D. Robust Intra-Body Communication Using SHA1-CRC Inversion-Based Protection and Error Correction for Securing Electronic Authentication. *MDPI Sensors*. 2020, no. 21, pp. 1–17.

18. IEC 62132-4–2006. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity 150 kHz to 1 GHz – Part 4: Direct RF power injection method. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6510> (Accessed: March 05, 2022).

19. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edition, 2005. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6185> (Accessed: March 05, 2022).

Artem V. Osintsev

Assistant, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-0888-6793
Phone: +7-952-755-01-23
Email: kubenet@gmail.com

Maxim E. Komnatov

Candidate of Science in Engineering,
Senior Researcher, Associate Professor,
Department of Television and Control, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-6463-2889
Phone: +7-952-888-38-96
Email: maxmek@mail.ru

УДК 004.89

А.В. Куртукова, А.С. Романов, А.М. Федотова, А.А. Шелупанов

Применение методов машинного обучения и отбора признаков на основе генетического алгоритма в решении задачи определения автора русскоязычного текста для кибербезопасности

Исследуются подходы к определению автора текста на естественном языке, достоинства и недостатки этих подходов. Процесс идентификации автора русскоязычного текста осуществляется с использованием классических алгоритмов машинного обучения и архитектур нейронных сетей (в том числе fastText, CNN и LSTM и их гибриды, BERT). Оценка эффективности моделей проводится на корпусе сообщений пользователей социальных сетей. Отдельный эксперимент посвящен отбору информативных признаков с помощью генетического алгоритма. Обучение SVM на отобранном генетическим алгоритмом множестве 400 признаков позволяет добиться до 10% прироста точности для всех рассмотренных корпусов авторов. Нейронные сети достигают точности классификации 96%, но при этом их время обучения в некоторых случаях в десятки раз превышает время, затраченное на обучение SVM и других классических методов машинного обучения. Для SVM совместно с генетическим алгоритмом средняя точность составила 66%, для глубоких нейронных сетей и fastText – 73 и 68% соответственно.

Ключевые слова: авторство, анализ текста, машинное обучение, нейронные сети, отбор признаков.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-79-85

В XXI в. интернет стал коммуникативным пространством информационного общества. У каждого человека появилась возможность высказывать свое мнение и получать отклик от читателей. Множество доступных электронных текстов, в том числе анонимных, указывает на широкий спектр применения методов определения авторства текста [1].

Отдельно стоит отметить публикацию материалов от имени публичных личностей со взломанных аккаунтов. Такой текст способен в кратчайшие сроки стать вирусным и цитируемым, а в случае содержания призывов к запрещенным законом действиям негативно сказаться на настроении в обществе. Сетевые средства массовой информации также активно используются злоумышленниками. Обычно пользователям не требуется предоставлять подлинную информацию о себе – имя, возраст, пол и адрес [2]. Это позволяет анонимно распространять антисоциальную информацию, угрозы и пропаганду терроризма. Методы определения авторства позволяют помочь установить личность создателя текста.

В данном исследовании задача определения автора текста поставлена следующим образом: имеются русскоязычные фрагменты текста, принадлежащие конечному множеству авторов. Авторство некоторых фрагментов установлено. Про остальные анонимные тексты известно, что они принадлежат одному из авторов, но какому – неизвестно. Посредством классификации необходимо определить принадлежность спорных фрагментов истинному автору. В таком случае множеством классов будет являться множество авторов, а тексты, авторы которых известны, – конечной обучающей выборкой. Цель классификации – определить авторство спорных текстов с максимально возможной точностью.

Научная новизна исследования заключается в применении ранее не использовавшихся для русско-

язычных текстов методов определения авторства: fastText, комбинации метода опорных векторов (SVM) с генетическим алгоритмом (ГА) для отбора признаков и сравнения этих методов, методы со свёрточной нейронной сетью (CNN), сети с долгой кратковременной памятью (LSTM), их гибриды, представления двунаправленных кодировщиков от Transformers (BERT), *K*-ближайших соседей (KNN), дерево решений (DT), случайный лес (RF) и наивный байесовский классификатор (NB). Следует отметить, что ранее эти методы не использовались для коротких комментариев пользователей социальных сетей.

Существует множество исследований по установлению авторства [3–4]. В ранней работе [1] представлен подробный обзор исследований 2015–2021 гг., включая подходы на основе глубоких нейронных сетей (НС), классических методов машинного обучения (МО), аспектного анализа. В большинстве подобных публикаций применялись различные особенности стиля письма [5], включая лексические, синтаксические, структурные и специфические относительно жанра и тематики текста признаки.

По состоянию на 2022 г. к моделям, успешно решающим смежные задачи текстового анализа, можно отнести LSTM, CNN, их гибриды, fastText, BERT.

При решении многих задач обработки естественного языка немало внимания уделяется качеству векторного представления текста. Созданная в 2016 г. библиотека fastText в реализации от Facebook [6] – серьезный шаг в развитии векторных семантических моделей и методов МО в обработке текста. Преимущество fastText состоит в скорости работы по сравнению с другими моделями. Однако для определения авторства русскоязычных текстов fastText еще не применялся. Поэтому этой модели

решено было уделить особое внимание в данном исследовании.

В большинстве работ применялись различные признаки как в совокупности – в виде их общего вектора, так и по отдельности. Однако не все из них эффективны. Наиболее часто применяют такие характеристики текста, как биграммы и триграммы символов и слов, распределение слов по частям речи, знаки пунктуации. Выделенные признаки могут быть информативными, неинформативными и избыточными. Неинформативные и избыточные признаки бесполезны для классификации. Кроме того, такие признаки могут снизить эффективность классификации из-за большой размерности признакового пространства. Цель отбора признаков [7] – получение подмножества информативных признаков и исключение неинформативных и избыточных. Стоит отметить, что общепринятой комбинации признаков, идентифицирующих автора, не существует, однако биграммы и триграммы символов и слов, распределение слов по частям речи, знаки пунктуации используются в большинстве работ.

Таким образом, целью данного исследования является оценка возможности использования классических методов МО и методов, основанных на НС, для определения автора русскоязычного текста, а также получение подмножества информативных признаков и исключение избыточных и неинформативных для повышения эффективности классификации.

Методы, используемые для определения автора текста

Множеством исследований была доказана эффективность SVM при решении задачи установления авторства текстов [1, 5]. Алгоритмы МО почти всегда требуют структурированных данных, в то время как глубокие НС способны к анализу текстовой последовательности и самостоятельному выделению сетью информативных признаков. Применяются глубокие НС, в частности, такие модели, как LSTM и CNN [8].

В дополнение к стандартным архитектурам глубоких НС, которые были описаны выше, часто используются различные комбинации архитектур [9], например, комбинация нескольких слоев LSTM подряд или CNN с постепенным уменьшением количества фильтров с целью выделить более общие закономерности. Это основано на том, что недостатки одной сети могут компенсироваться преимуществами другой. В данной работе рассмотрены комбинации LSTM и CNN, которые показали отличные результаты в смежной задаче по определению автора исходного кода программы [10]. Стоит отметить, что популярные современные архитектуры CNN с механизмом самовнимания и Transformers в предыдущем исследовании [1] оказались менее точными и наиболее времязатратными, поэтому в этом исследовании более не рассматривались.

Использование простых проверенных методов во многих случаях более оправдано, чем применение новых подходов. Таким образом, в предыдущей

работе [2] точность SVM была сопоставима с более современными методами глубокого обучения, в то время как SVM обучался намного быстрее. Поэтому было принято решение расширить список классических методов и протестировать NB, DT, RF, KNN. Преимуществом этих методов является наглядность процесса принятия решения, в отличие от НС, которые представляют собой черный ящик. Результаты классических методов могут быть логически обоснованы, что важно в криминалистике и других областях.

Постановка эксперимента

Важной частью исследования являются сбор и предобработка данных. Модели МО, в частности, глубокие архитектуры, очень требовательны к качеству и объему данных. С этой целью был собран авторский набор данных, включающий большой объем сообщений пользователей социальной сети.

Ещё одним фактором, влияющим на результаты экспериментов, является правильность формирования признакового пространства. В случае с глубокими НС основная сложность состоит уже не в формировании признакового пространства, а в подборе гиперпараметров, управляющих процессом обучения моделей. Даже минимальные изменения этих параметров могут оказать серьезное влияние на результат. Для экспериментальных моделей гиперпараметры подобраны исходя из опыта прошлых исследований авторов [2].

В рамках исследования рассматривалась проблема определения автора текста применительно набору данных, содержащему 202892 коротких комментария 3075 пользователей социальной сети ВКонтакте (VK). Выбор таких данных обоснован максимальной приближенностью к реальным криминалистическим задачам из-за небольшого количества текстов на автора и длины сообщений.

Целью предобработки является очистка набора данных от шумов и избыточной информации, а также преобразование текста в формат, понятный классификатору. В рамках данного исследования подготовка текстов была стандартной:

- перевод всех букв в тексте в нижний регистр;
- удаление стоп-слов;
- удаление цифр и специальных символов;
- форматирование пробельных символов.

На основе обработанного текста строится признаковое пространство текста. При формировании признакового пространства фиксируется совокупность n показателей, измеряемых по каждому тексту. Вектор состоит из различных частотных признаков: частот встречаемости знаков препинания, частей речи, частот униграмм, биграмм и триграмм символов, частот наиболее популярных слов русского языка (основываясь на частотном словаре [11]). Для приведения признаков к общей шкале без потери информации о различии диапазонов применена минимаксная нормализация. Для работы с НС тексты кодируются с помощью метода One-Hot Encoding.

Тексты разделялись в соотношении 80:20 на обучающую и тестовую выборки. Также использо-

валясь процедура кроссвалидации. Для оценки качества классификации была рассчитана точность, полученная как доля текстов, по которым классификатор принял правильное решение.

Параметры обучения моделей МО были определены эмпирически, основываясь на опыте предыдущих исследований [12, 13]:

- в качестве алгоритма обучения SVM использовался последовательный метод оптимизации. Линейное ядро. Параметр регуляризации равен 1, а допустимый уровень ошибки задан 0,00001;

- для KNN использовались различные значения k , а именно: 3, 5, 7, 15, 25;

- для обучения DT в качестве функции определения качества разбиения использовалась «gini», а максимальная глубина дерева соответствовала 8 разбиениям в ветвях;

- для обучения RF использовалось 5, 15, 25, 35 и 50 деревьев решений.

При обучении глубоких НС в качестве входного слоя каждой сети использовался слой встраивания. Выходной размер слоя – 300, на следующем слое использовался метод исключения с параметром 0,2. Также применялась функция активации выходного слоя – логистическая функция для многомерного случая (Softmax), алгоритм оптимизации – adaptive moment estimation (Adam), метрика – точность. В качестве процедуры оценки эффективности моделей использовалась кроссвалидация по 10 фолдам. Параметры обучения были подобраны экспериментально, исходя из опыта исследователей в области анализа текстовых данных [12]:

- число свёрточных фильтров для CNN – 512, размер ядра – 3. В качестве функции активации была выбрана rectified linear unit (ReLU), а объединяющий слой – GlobalMaxPooling;

- число фильтров для LSTM и BiLSTM – 128. В качестве инструментов прореживания применялись dropout и recurrent dropout с параметром 0,3. Функция активации аналогична CNN;

- в качестве гиперпараметров для гибридов LSTM и CNN использовалось 512 свёрточных фильтров, размер ядра – 3, 128 рекуррентных фильтров. Функцией активации выбрана ReLU, объединяющим слоем – GlobalMaxPooling. Процесс прореживания происходил аналогично LSTM. Функция активации аналогична CNN;

- для fastText количество элементов n -грамм составило 2–4. Размерность – 50. В качестве функции потерь использована «ova» (softmax loss for multi-label classification). Остальные параметры по умолчанию.

Результаты

В табл. 1 и 2 приведены точности для корпусов из 2, 5, 10, 20 и 50 авторов, а также средняя точность по каждой модели для классических методов МО и НС.

Время обучения всех рассмотренных моделей на корпусе 50 авторов приведено в табл. 3.

Таблица 1
Результаты определения автора с использованием МО, обученных на признаковом пространстве

	Точность моделей, %					Средняя точность
	2	5	10	20	50	
SVM	72±4	70±4	66±4	65±3	32±4	59±3
NB	63±2	59±3	46±4	39±4	29±3	47±3
DT	69±2	54±2	34±4	30±4	26±3	44±3
RF	71±4	56±3	38±3	32±2	26±2	46±3
KNN	68±4	65±4	62±4	44±4	34±3	55±4

Таблица 2
Результаты определения автора с использованием НС

Модели	Точность моделей, %					Средняя точность
	2	5	10	20	50	
LSTM	93±2	90±2	73±3	69±2	50±3	75±2
BiLSTM	95±2	93±2	71±2	59±1	50±4	74±2
CNN	96±2	93±2	72±3	68±1	49±4	76±3
CNN+LSTM	96±4	91±2	77±4	62±3	47±2	75±3
LSTM+CNN	92±2	90±1	64±3	61±1	47±3	71±3
fastText	94±1	87±2	76±4	68±2	56±3	76±2
RuBERT	93±2	89±2	77±3	67±3	50±3	75±3
MultiBERT	90±2	87±2	70±3	63±3	47±3	72±3

Таблица 3
Время обучения моделей на корпусе 50 авторов

Модели НС	Время обучения, с	Модели МО	Время обучения, с
LSTM	30190	SVM	589
BiLSTM	32980		
CNN	25380	NB	308
CNN+LSTM	26467		
LSTM+CNN	28397	DT	236
fastText	15926		
RuBERT	26547	RF	804
MultiBERT	27117		
		KNN	644

Полученные результаты позволяют сделать вывод о неэффективности классических методов МО даже при использовании сформированного признакового пространства. Это связано с тем, что длины комментариев очень малы и в среднем составляют всего 13,3 символа. Содержимое комментариев отражает эмоции автора по отношению к комментируемому событию, поэтому преобладают односложные высказывания. В связи с этим объем текста характеристик автора даже на тщательно сформированном пространстве признаков. SVM, обученный на экспериментально подобранных параметрах и признаковом пространстве, достигает максимальной точности 72% для двух авторов, в то время как глубокие НС способны классифицировать с точностью 96% при той же сложности задачи. Данный факт объясняется способностью глубоких НС к самостоятельному выделению неявных информативных при-

знаков. FastText превосходит по точности LSTM+CNN для всех рассмотренных наборов авторов и обучается в среднем на 39% быстрее. Также для 2 и 10 авторов точность fastText выше, чем BiLSTM, а в случае 50 авторов превосходит все остальные модели. По скорости обучения fastText превосходит все рассмотренные глубокие НС в среднем на 42%.

Отбор информативных признаков с помощью генетического алгоритма

Отбор признаков на основе генетического алгоритма позволяет выделить оптимальное подмножество из общего множества признаков. Помимо прироста в точности за счет удаления избыточных и неинформативных признаков, такое решение позволяет ускорить обучение модели.

Всего в ГА используются три оператора: селекция, скрещивание, мутация. Для работы алгоритма необходимо задать вероятности для операторов скрещивания и мутации, а также задать тип селекции. С увеличением количества поколений возрастает вероятность нахождения глобального оптимума – популяции, гены которой являются наиболее приспособленными. Критерием остановки могут служить пороговое значение точности классификации, исчерпание времени работы алгоритма или заданного числа обращений к целевой функции, определенной как средняя точность SVM по кроссвалидации. Хромосома представляет собой бинарный вектор признаков, где сами признаки представляют собой гены, 1 соответствует вхождению признака в множество информативных, 0 означает исключение признака из оптимального множества.

В данном исследовании ГА использовался совместно с SVM. Такой выбор обоснован тем, что именно SVM в большинстве случаев продемонстрировал лучшую точность среди классических методов МО. В применении ГА совместно с глубокими НС нет необходимости ввиду способности таких архитектур к самостоятельному поиску информативных признаков. Работа алгоритма выполнялась до достижения заданного количества итераций, затем выбиралось лучшее решение – то, где значение целевой функции максимально. В качестве типа селекции была выбрана элитная селекция. Суть выбранного типа в том, что выбираются лучшие признаки на основе сравнения значений точности. Далее они вступают в различные преобразования, после которых выбираются новые элитные элементы, данный процесс продолжается до момента прекращения появления элитных элементов.

Одной из сложностей использования ГА является задание значений вероятностей для операций мутации и скрещивания. В настоящее время нет общепринятых норм и правил, согласно которым требуется выбрать конкретные значения, поэтому в данном исследовании значения параметров операций скрещивания и мутации подбирались экспериментально SVM. ГА задан следующими параметрами:

- коэффициент скрещивания: 0,5;
- коэффициент мутации: 0,2;
- количество популяций: 1000.

Эксперименты проводились для получения 50, 100, 200, 300, 400, 500 признаков из исходных 1168. При полном переборе время отбора таких подмножеств очень велико, поэтому использовалось ограничение по количеству обращений к целевой функции. Для получения 50, 100, 200, 300, 400 и 500 признаков в результирующем наборе было установлено ограничение на выбранное количество признаков как максимальное. Результаты экспериментов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты отбора признаков для комментариев пользователей социальной сети

Кол-во признаков	Точность моделей, %					
	2	5	10	20	50	Средняя точность
50	65±6	50±4	47±2	44±4	22±4	46±4
100	65±4	59±4	57±4	49±4	27±3	52±4
200	67±5	64±4	60±4	53±4	27±4	54±4
300	75±5	72±2	67±3	59±3	34±3	61±3
400	80±3	77±3	72±3	65±3	37±4	66±3
500	75±3	70±3	68±4	62±3	35±4	62±4
1168	72±4	70±4	66±4	65±3	32±4	59±3

Исходя из представленных результатов, уменьшение количества признаков более чем вдвое не только не снижает точность классификации, но и позволяет улучшить результат определения автора текста. Точность, полученная для 200 признаков, сопоставима с исходной. 100 и 50 признаков не являются достаточными для определения автора. Набор 400 признаков, на котором была достигнута максимальная точность, содержит частотные распределения 6 знаков пунктуации, 8 частей речи, 20 униграмм символов, 107 биграмм символов, 98 триграмм символов и 165 слов из частотного словаря.

Чтобы проверить наличие статистически значимой разницы между результатами, полученными SVM, обученным с использованием различного количества информативных признаков, выбранных ГА, и различными результатами перекрестной проверки, были применены ранговые апостериорные тесты Фридмана [14] и Неменьи [15]. Тесты проводились для самого сложного из рассмотренных случаев – классификации 50 авторов. Нулевая гипотеза заключалась в том, что разница между результатами, полученными на разном количестве признаков, является только случайной. Альтернативная гипотеза заключалась в том, что существует статистически значимая разница между результатами. Значение p составило 0,0007. Поскольку это значение меньше 0,05, нулевую гипотезу можно отвергнуть.

Эффективность методов существенно различается, если соответствующие средние ранги отличаются хотя бы на величину критической разницы. Чтобы оценить разницу, был применен апостериорный тест Неменьи после отклонения нулевой гипотезы теста Фридмана. Данный тест Неменьи предна-

значен для обнаружения различных групп данных. Результаты представлены на рис. 1 в виде диаграммы значимости Демшара [16]. В случае, если разница средних рангов между двумя методами меньше, чем автоматически рассчитанное значение критической разницы, разница в их производительности незначительна и на рисунке представлена горизонтальной линией.

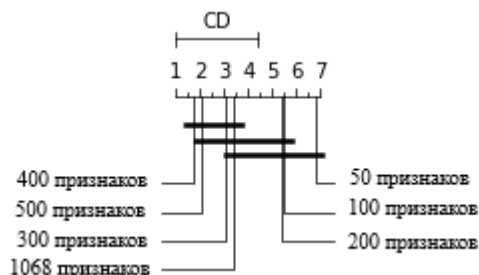


Рис. 1. Диаграмма значимости Демшара

Как видно из диаграммы, уменьшение до 50–100 информативных признаков отрицательно сказалось на точности. Тот же результат был достигнут с использованием всего пространства 1168 признаков. Наборы из 200–400 признаков позволили добиться сопоставимой точности классификации. Лучшим вариантом признано использование SVM, обученного на 400 признаках, полученных ГА, худшим – ограничение количества признаков до 50.

Заключение

Реализованные в работе методы показывают результаты, сопоставимые и превосходящие рассмотренные в рамках обзора аналоги. Для классических методов МО рассмотрена классификация на сформированном признаковом пространстве. В данном случае не удаётся достичь результатов, сопоставимых с полученными при обучении глубоких НС. Для различного количества авторов разница в точности варьируется от 2 до 30%. Обоснование этого факта кроется в недостаточной для формирования вектора длине односложных высказываний и предложений, математически описывающего авторский инвариант.

С целью улучшения качества классификации SVM проведен отбор информативных признаков ГА. В рамках отбора поставлена задача максимизации целевой функции. Из исходного множества 1168 признаков отбирались подмножества 500, 400, 300, 200, 100 и 50 признаков согласно значению целевой функции. Такое решение позволяет не только выделить информативные признаки, но и устранить избыточные, затрудняющие классификацию. Векторы, состоящие из 50 признаков, не позволяют улучшить классификацию. Обучение SVM на отобранном ГА множестве 400 признаков позволяет добиться до 10% прироста точности для всех рассмотренных корпусов авторов. Подобное решение позволяет ускорить процесс обучения классификатора, снизить нагрузку на вычислительные ресурсы и устранить избыточность набора признаков.

Глубокие НС, в отличие от SVM, способны самостоятельно выявлять неявные информативные

признаки для классификации. При обучении CNN получена точность 96%, что превосходит точность SVM, обученном на отобранном множестве признаков, и является максимальным результатом во всей серии экспериментов. Точность сетей с долгой краткосрочной памятью, в том числе двунаправленных, а также их комбинации с CNN достигают высокой точности для всех наборов данных, но при этом их время обучения в некоторых случаях в десятки раз превышает время, затраченное на обучение SVM и других классических методов МО. Оптимальным вариантом является fastText, скорость обучения которого в среднем на 51% меньше, чем для других рассмотренных глубоких НС, а точность ниже максимальной по всем моделям не более чем на 3%.

При выборе метода определения автора текста следует руководствоваться оценкой подлежащих исследованию текстов, учитывая их объем, количество образцов и источник. В случае ограниченности ресурсов следует использовать классические методы МО и ГА. В случае возможности умышленного искажения текста или вероятности атаки больше подойдут глубокие НС ввиду способности выявления неявных признаков авторского стиля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части Государственного задания ТУСУРа на 2020–2022 гг. (проект № FEWM-2020-0037).

Литература

1. Романов А.С. Разработка и исследование математических моделей, методик и программных средств информационных процессов при идентификации автора текста / А.С. Романов, А.А. Шелупанов, Р.В. Мещеряков. – Томск: В-Спектр, 2011. – 188 с.
2. Authorship Identification of a Russian-Language Text Using Support Vector Machine and Deep Neural Networks / A. Romanov, A. Kurtukova, A. Shelupanov, A. Fedotova, V. Goncharov // Future Internet. – 2021. – No. 1. – URL: <https://www.mdpi.com/1999-5903/13/1/3/html>, свободный (дата обращения: 25.12.2021).
3. Boenninghoff B. Deep bayes factor scoring for authorship verification // arXiv preprint arXiv:2008.10105. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2008.10105>, свободный (дата обращения: 26.12.2021).
4. Jafariakinabad F. Self-supervised Representation Learning of Sentence Structure for Authorship Attribution / F. Jafariakinabad, K.A. Hua. – arXiv preprint arXiv:2010.06786. 2020. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2010.06786.pdf>, свободный (дата обращения: 26.12.2021).
5. Uchendu A. Authorship Attribution for Neural Text Generation // Proc. of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). – 2020. – P. 8384–8395.
6. FastText: Library for efficient text classification and representation learning. – URL: <https://fasttext.cc>, свободный (дата обращения: 28.12.2021).
7. Sarin K.S. Bagged ensemble of fuzzy classifiers and feature selection for handwritten signature verification / K.S. Sarin, I.A. Hodashinsky. – Computer Optics. – 2019. – Vol. 43, No. 5. – P. 833–845.

8. Explainable Authorship Verification in Social Media via Attention-based Similarity Learning / B. Boenninghoff, S. Hessler, D. Kolossa, M. Nickel // IEEE International Conference on Big Data (Big Data). – 2019. – P. 36–45. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1910.08144>, свободный (дата обращения: 30.12.2021).

9. Исхакова А.О. Метод и программное средство определения искусственно созданных текстов: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2016. – 123 с.

10. Kurtukova A. Source Code Authorship Identification Using Deep Neural Networks / A. Kurtukova, A. Romanov, A. Shelupanov. – Symmetry. – 2020. – No. 12. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/12/2044/html>, свободный (дата обращения: 04.01.2022).

11. Ляшевская О.Н., Шаров С.А. Новый частотный словарь русской лексики. – URL: <http://dict.ruslang.ru/freq.php> (дата обращения: 06.01.2022).

12. Determining the Age of the Author of the Text Based on Deep Neural Network Models / A.S. Romanov, A.V. Kurtukova, A.A. Sobolev, A.A. Shelupanov, A.M. Fedotova // Information. – 2020. – No. 12. – URL: <https://www.mdpi.com/2078-2489/11/12/589/html>, свободный (дата обращения: 07.01.2022).

13. Natural Text Anonymization Using Universal Transformer with a Self-attention / A. Romanov, A. Kurtukova, A. Fedotova, R. Meshcheryakov // Proceedings of the III International Conference on Language Engineering and Applied Linguistics (PRLEAL – 2019), November 27, 2019. – Saint-Petersburg, Russia, 2019. – P. 22–37.

14. Friedman Test in SPSS Statistics. – URL: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/friedman-test-using-spss-statistics.php> (дата обращения: 09.01.2022).

15. Friedman Test Post-hoc Analysis. – URL: <https://www.real-statistics.com/anova-repeated-measures/friedman-test/friedman-test-post-hoc-analysis> (дата обращения: 09.01.2022).

16. CD diagrams for the post-hoc Nemenyi test. – URL: https://www.imsbio.co.jp/RGM/R_rdfile?f=performanceEstimation/man/CDdiagram.Nemenyi.Rd&d=R_CC (дата обращения: 09.01.2022).

Куртукова Анна Владимировна

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-905-991-67-13
Эл. почта: av.kurtukova@gmail.com

Романов Александр Сергеевич

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

Федотова Анастасия Михайловна

Студентка каф. безопасности информационных систем (БИС) ТУСУР Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-444-41-25
Эл. почта: fedotova.a.747@e.tusur.ru

Шелупанов Александр Александрович

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

Kurtukova A.V., Romanov A.S., Fedotova A.M., Shelupanov A.A.

Application of machine learning methods and feature selection based on a genetic algorithm in solving the problem of determining the authorship of a Russian-language text for cybersecurity

The article explores the approaches to determine the author of a natural language text, the advantages and disadvantages of these approaches. The identification is carried out using classical machine learning algorithms and neural network architectures (including fastText, CNN and LSTM and their hybrids, BERT). The efficiency of the model is evaluated based on the social media texts dataset. A separate experiment is devoted to the feature selection using a genetic algorithm. SVM trained on a selected 400 features set makes it possible to achieve up to 10% increase in accuracy for all considered numbers of authors. Neural networks achieve a classification accuracy of 96%, but their training time in some cases exceeds the time spent on training SVM and other classical machine learning methods in some cases. For SVM together with the genetic algorithm, the average accuracy was 66%, for deep neural networks and fastText – 73 and 68%, respectively.

Keywords: authorship, text mining, machine learning, neural networks, deep learning, feature selection.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-79-85

References

1. Romanov A.S., Shelupanov A.A., Meshcheryakov, R.V. [Development and Research of Mathematical Models, Methods and Software Tools of Information Processes in the Identification of the Author of the Text]. Tomsk, V-Spektr, 2011, 188 p. (in Russ.).
2. Romanov A., Kurtukova A., Shelupanov A., Fedotova A., Goncharov V. Authorship Identification of a Russian-Language Text Using Support Vector Machine and Deep Neural Networks. *MDPI Future Internet*, 2021, no. 1. Available at: <https://www.mdpi.com/1999-5903/13/1/3/html> (Accessed: December 25, 2021).
3. Boenninghoff B. Deep bayes factor scoring for authorship verification. arXiv preprint arXiv:2008.10105. 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/2008.10105> (Accessed: December 26, 2021).
4. A Self-supervised Representation Learning of Sentence Structure for Authorship Attribution. arXiv preprint arXiv:2010.06786. 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/2010.06786> (Accessed: December 26, 2021).
5. Uchendu A. Authorship Attribution for Neural Text Generation. Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP), 2020, pp. 8384–8395.
6. FastText: Library for efficient text classification and representation learning. Available at: <https://fasttext.cc> (Accessed: December 28, 2021).
7. Sarin K.S., Hodashinsky I.A. Bagged ensemble of fuzzy classifiers and feature selection for handwritten signature verification. *Computer Optics*, 2019, vol. 43, no. 5, pp. 833–845.
8. Boenninghoff B., Hessler S., Kolossa D., Nickel M. Explainable Authorship Verification in Social Media via At-

tention-based Similarity Learning. *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Los Angeles, CA, USA, 9–12 December 2019*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1910.08144> (Accessed: December 30, 2021).

9. Iskhakova A.O. [Method and Software for Determining Artificially Created Texts]. Cand. Diss. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, 123 p. (in Russ.).

10. Kurtukova A., Romanov A., Shelupanov A. Source Code Authorship Identification Using Deep Neural Networks. *MDPI Symmetry*, 2020, no. 12. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/12/2044/htm> (Accessed: January 4, 2022).

11. Lyashevskaya O. N., Sharov S. A. New frequency dictionary of Russian vocabulary. Available at: <http://dict.ruslang.ru/freq.php> (Accessed: January 6, 2022) (in Russ.).

12. Romanov A.S., Kurtukova A.V., Sobolev A.A., Shelupanov A.A., Fedotova A.M. Determining the Age of the Author of the Text Based on Deep Neural Network Models. *MDPI Information*. 2020, no. 12. Available at: <https://www.mdpi.com/2078-2489/11/12/589/htm> (Accessed: January 7, 2022).

13. Romanov A., Kurtukova A., Fedotova A., Meshcheryakov R. Natural Text Anonymization Using Universal Transformer with a Self-attention. *Proceedings of the III International Conference on Language Engineering and Applied Linguistics (PRLEAL – 2019)*. Saint Petersburg, Russia, November 27, 2019, pp. 22–37.

14. Friedman Test in SPSS Statistics. Available at: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/friedman-test-using-spss-statistics.php> (Accessed: January 9, 2022).

15. Friedman Test Post-hoc Analysis. Available at: <https://www.real-statistics.com/anova-repeated-measures/friedman-test/friedman-test-post-hoc-analysis> (Accessed: January 9, 2022).

16. CD diagrams for the post-hoc Nemenyi test. Available at: https://www.imsbio.co.jp/RGM/R_rdfile?f=performanceEstimation/man/Cddiagram.Nemenyi.Rd&d=R_CC (Accessed: January 9, 2022).

Anna V. Kurtukova

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

Aleksandr S. Romanov

Candidate of Science in Engineering, Associate professor, Department of KIBEVS, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-34-26
Email: alexs.romanov@gmail.com

Anastasia M. Fedotova

Student, Department of Information System Security (ACS), TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-444-41-25
Email: fedotova.a.747@e.tusur.ru

Alexandr A. Shelupanov

Doctor of Science in Engineering, Professor, President TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 90-71-55
Email: saa@tusur.ru

УДК 621.865.8; 681.51

С.П. Круглов, Д.Н. Аксаментов

Адаптивное управление мостовым краном по скорости перемещения тележки

Предлагается способ автоматического управления по скорости перемещения тележки крана мостового типа с прямым отслеживанием горизонтального перемещения груза в условиях текущей неопределенности параметров груза и внешних возмущений. Цель управления – точное позиционирование переносимого груза с гашением его маятниковых колебаний и парирование внешних возмущений. Описывается динамика мостового крана при перемещении тележки по одной оси. Предлагаемый метод управления основан на схеме адаптивного управления с идентификатором и неявной эталонной моделью с использованием «упрощенных» условий адаптируемости. Доказана устойчивость замкнутой системы управления и определены условия для этого. Для текущей идентификации параметров груза используется рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания. Данный метод управления разрабатывался специально для исследования и отладки на экспериментальной установке, поэтому все параметры крана и груза при расчётах были приближены к макету. Приведены результаты компьютерного моделирования предложенного способа управления с различными массоинерционными свойствами груза, длины его подвеса и возмущениями в программной среде MatLab Simulink. Результаты показали высокую эффективность предложенной адаптивной системы управления. Она обеспечивает точное перемещение груза за короткий промежуток времени, предотвращает раскачивание груза во время ускорения и торможения тележки, а также способна парировать внешнее возмущение, например воздействие ветра, требует минимальных начальных настроек. Разработанный подход может быть рекомендован для любых крановых установок, использующих подвешенный груз.

Ключевые слова: адаптивная система управления, мостовой кран, эталонная модель, закон управления, парирование внешних возмущений, идентификационный алгоритм, устойчивость замкнутой системы управления.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-86-92

Одним из основных направлений в развитии грузоподъемного оборудования, в частности, грузовых кранов мостового типа, является автоматизированное управление позиционированием и гашением маятниковых колебаний груза, разработка качественно новых и модернизация существующих способов управления. На сегодняшний день опубликовано большое количество работ по данной тематике [1–12].

В работах [1–4] для решения проблемы раскачивания груза во время его транспортировки предлагается использовать ПИД-регулирование и ПД-регулирование с предварительной настройкой коэффициентов под заранее известные параметры крана и груза. В [5] описывается способ управления с модернизированным ПД-регулятором с сигмоидальной функцией. В работах [6, 7] предлагается подход с управлением на основе нечеткой логики, который не всегда справляется с «нештатными» ситуациями и всем спектром возмущений. В [8, 9] предлагается решение с управлением на основе скользящих режимов в сочетании с нейроконтроллером и нечетким управлением. Нейроконтроллеры требуют длительного обучения и не обеспечивают качество управления при непредвиденных возмущениях. В [10] описывается подход с адаптивным управлением, однако идентификация параметров крана осуществляется до самого перемещения груза. Это может отрицательно сказаться на управлении при изменении параметров крана или возникновении внешних возмущений во время переходного процесса.

Одним из перспективных направлений данного направления является разработка адаптивной системы управления. Преимуществом данного подхода

является то, что для управления крановым механизмом адаптивная система управления с идентификационным алгоритмом не требует полной информации о параметрах крана, переносимого груза и возмущениях. Их определение может происходить в текущий момент времени, что значительно упрощает предварительную настройку автоматической системы управления. Изменение указанных параметров связано с различием массы и габаритов груза, длины троса, который удерживает груз, а также воздействием ветра, переменной силой трения тележки при передвижении и др.

Настоящая работа направлена на модернизацию ранее предложенной адаптивной системы управления мостовым краном и, в частности, нацеленной на непосредственное отслеживание горизонтального перемещения груза на заданной высоте в назначенную точку в условиях текущей неопределенности параметров системы управления и внешних возмущений [11, 12]. Указанные системы управления построены по схеме с текущей параметрической идентификацией (идентификатором), с неявным эталоном и на основе «упрощенных» условий адаптируемости [13].

Основным отличием настоящей работы от [11, 12] является использование в качестве условного управляющего сигнала скорости перемещения тележки крана вместо прикладываемого к ней усилия со стороны привода. Такое решение оправдано, если в качестве привода тележки крана используется сервопривод или шаговый двигатель. Также эта постановка упрощает реализацию системы управления, в частности, становится проще алгоритм текущей

идентификации из-за уменьшения числа искомых параметров. Кроме того, в этой работе приводится доказательство устойчивости замкнутой системы управления.

В статье рассматривается перемещение груза только по одной оси мостового крана, поскольку принцип управления перемещением груза по второй оси аналогичен и не требует отдельного рассмотрения.

Уравнение динамики объекта управления

Математическое описание динамики мостового крана при перемещении тележки по одной оси хорошо изучено, см., например, [15]. Схема движения тележки крана и перемещение груза представлена на рис. 1.

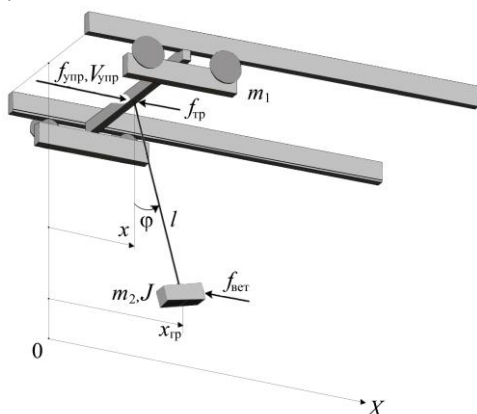


Рис. 1. Схема перемещения груза по одной оси

На рис. 1 введены следующие обозначения: тележка с линейным перемещением x по оси X с массой m_1 ($V_{\text{упр}} = V = \dot{x}$ – скорость перемещения тележки, она же – условный управляющий сигнал, в силу использования сервопривода или шагового двигателя); на тележку действуют управляющая сила $f_{\text{упр}}$ и сила трения $f_{\text{тр}}$; груз массой m_2 и центральным моментом инерции J ; на груз действует горизонтальная сила воздействия ветра $f_{\text{вет}}$; груз связан с тележкой с помощью гибкой подвески длиной l ; φ – угол отклонения троса от вертикальной оси; $x_{\text{тр}}$ – координата перемещения груза по оси X .

Если считать управляющим воздействием силовое воздействие от привода, то уравнения поступательного и вращательного движения системы «тележка–маятник», без учета массы троса и трения углового движения (в силу их малости), а также без учета начальных значений переменных по положению и скорости, описываются как [15]

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} + (m_2 \cos \varphi)\ddot{\varphi} = f_{\text{упр}} + m_2 l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi - k_x \dot{x} - f_{\text{с.тр}}; \\ (m_2 \cos \varphi)\ddot{x} + (m_2 l^2 + J)\ddot{\varphi} = -m_2 g l \sin \varphi - l f_{\text{вет}} \cos \varphi; \\ x_{\text{тр}} = x + l \sin \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; указанные производные переменных взяты по времени (t); $f_{\text{с.тр}}$ – сила сухого трения; k_x – коэффициент вяз-

кого трения поступательного перемещения тележки; указанные выше параметры в общем случае являются переменными и заранее неизвестными (за исключением параметров g , m_1 и $m_{2\text{max}}$ – максимальной массы груза).

Учитывая небольшие углы отклонения груза (типичное значение $|\varphi| < 30^\circ$), малую скорость углового перемещения и физику движения, примем следующие упрощения: $\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$, $\dot{\varphi}^2 \sin \varphi \approx 0$. С учетом этих упрощений система (1) переписывается относительно переменных \ddot{x} , $\ddot{\varphi}$ и $x_{\text{тр}}$ в виде

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx a_{x1} f_{\text{упр}} + a_{x2} \varphi + a_{x3} \dot{x} + a_{x4}; \\ \ddot{\varphi} \approx a_{\varphi1} f_{\text{упр}} + a_{\varphi2} \varphi + a_{\varphi3} \dot{x} + a_{\varphi4}; \\ x_{\text{тр}} \approx x + l \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} a_{x1} &= \gamma^{-1} (m_2 l^2 + J); & a_{x2} &= \gamma^{-1} g (m_2 l)^2; \\ a_{x3} &= -\gamma^{-1} (m_2 l^2 + J) k_x; \\ a_{x4} &= \gamma^{-1} [-(m_2 l^2 + J) f_{\text{с.тр}} + m_2 l^2 f_{\text{вет}}]; \\ a_{\varphi1} &= -\gamma^{-1} m_2 l; & a_{\varphi2} &= -\gamma^{-1} (m_1 + m_2) m_2 g l; \\ a_{\varphi3} &= \gamma^{-1} m_2 l k_x; & a_{\varphi4} &= \gamma^{-1} l [m_2 f_{\text{с.тр}} - (m_1 + m_2) f_{\text{вет}}]; \\ \gamma &= [m_1 m_2 l^2 + (m_1 + m_2) J]. \end{aligned}$$

Из последнего равенства системы (2) на основании первых двух уравнений получаем уравнение динамики исследуемого объекта, управляемого силой [12]:

$$\ddot{x}_{\text{тр}} \approx a_1 f_{\text{упр}} + a_2 \varphi + a_3 \dot{x} + a_4, \quad (3)$$

где $a_1 = a_{x1} + l a_{\varphi1}$; $a_2 = a_{x2} + l a_{\varphi2}$; $a_3 = a_{x3} + l a_{\varphi3}$; $a_4 = a_{x4} + l a_{\varphi4}$.

Для вывода уравнения динамики перемещения груза в зависимости от скорости тележки выполним следующее: из первой зависимости системы (2) выразим значение $f_{\text{упр}}$ и подставим его в (3), получим, с учетом того, что $(a_3 - a_1 a_{x3} / a_{x1}) = 0$,

$$\ddot{x}_{\text{тр}} \approx a_1^V \dot{V} + a_2^V \varphi + a_3^V, \quad (4)$$

где

$$a_1^V = a_1 / a_{x1} = J / (J + m_2 l^2), \quad 1 \geq a_1^V > 0,$$

$$a_2^V = (a_2 - a_1 a_{x2} / a_{x1}), \quad a_3^V = (a_4 - a_1 a_{x4} / a_{x1}).$$

Далее это уравнение, описывающее динамику перемещения груза, будем использовать в качестве объекта управления с формированием управляющего воздействия в виде изменения скорости перемещения тележки $V = V_{\text{упр}}$ с учетом φ и оценок параметров (4), доставляемых алгоритмом идентификации, для обеспечения перемещения груза в заданную точку и гашения угловых колебаний.

Закон управления

В соответствии с методологией синтеза управления, изложенной в [13], в качестве эталонной модели, задающей требуемые характеристики перемещения груза, принимается неявная модель в виде колебательного звена со значениями переменных в начальный момент времени, равными соответствующим для исходного объекта [16]:

$$\ddot{x}_M = a_{M1}\dot{x}_M + a_{M0}(x_M - x_{гр}^{зад}), \quad x_M(t_0) = x_{гр}(t_0), \quad (5)$$

где x_M – переменная, описывающая эталонную динамику движения груза по оси X ; $x_{гр}^{зад}$ – заданное значение $x_{гр}$, или назначенное место доставки груза (целевая точка), формируемое оператором крана с помощью органов управления краном; выбираемые параметры эталонной модели: $a_{M1} = -2\xi_M\omega_M$; $a_{M0} = -(\omega_M)^2$; $\xi_M > 0$ – эталонное значение относительного коэффициента затухания; $\omega_M = 0,5\sqrt{g/\tilde{l}_{30\%}} > 0$ – эталонное значение собственной частоты (смысл этого назначения поясняется далее); $\tilde{l}_{30\%}$ – оценка длины подвеса груза с погрешностью не хуже $\pm 30\%$, получаемая, например, интегрированием скорости вертикального перемещения груза (приблизительно постоянна) с коррекцией в крайних точках [12]; t_0 – начальный момент времени.

Предположим, что динамика движения груза вместо уравнения (4) описывается как

$$\ddot{x}_{гр} \cong a_{M1}\dot{x}_{гр} + a_{M0}(x_{гр} - x_{гр}^{зад}), \quad (6)$$

что соответствует динамике назначенной эталонной модели (5). Рассмотрим, как этого добиться путем формирования закона управления – условного управляющего сигнала.

Подставляя в уравнение (4) вместо его левой части правую часть уравнения (6) и заменяя $\dot{x}_{гр}$ на \dot{x} , чтобы устранить внутреннюю неустойчивость [12], определяем условный управляющий сигнал $V_{упр}$, вычисленный при точных значениях параметров объекта (точный закон управления):

$$TV_{упр} + V_{упр} = -a_{M1}^{-1} \left[a_{M0}(x_{гр} - x_{гр}^{зад}) - a_2^V \phi - a_3^V \right], \quad (7)$$

где $T = -a_1^V/a_{M1}$.

Из полученной зависимости следует, что искомым условным управляющим сигналом можно получить путем фильтрации сигнала, описываемого правой частью (7), на апериодическом звене $1/(Ts+1)$, где s – переменная преобразования Лапласа. Поскольку параметр a_1^V положительный, а параметр a_{M1} отрицательный, то $T > 0$, отсюда обеспечивается внутренняя устойчивость формирования $V_{упр}$ в зависимости от правой части (7).

Если закон управления (7) подставить в (4), то получим уравнение движения замкнутой системы управления

$$\ddot{x}_{гр} - a_{M1}\dot{x}_{гр} - a_{M0}(x_{гр} - x_{гр}^{зад}) \approx -a_{M1}l\dot{\phi}. \quad (8)$$

Или через уравнение несоответствия замкнутой системы управления заданной эталонной модели

(ошибки управления): $e \triangleq x_M - x_{гр}$, на основании (8) и (5)

$$\ddot{e} - a_{M1}\dot{e} - a_{M0}e \approx a_{M1}l\dot{\phi}, \quad e(t_0) = 0. \quad (9)$$

В силу устойчивости назначенной эталонной модели, левые части равенств (8) и первого из (9) описываются устойчивым дифференциальным уравнением. Поэтому если в процессе управления обеспечивается условие $\dot{\phi} \rightarrow 0$, то налицо асимптотическая тождественность поведения замкнутой системы управления назначенному эталону. Докажем, что закон управления (7) обеспечивает это в целевой точке.

Заметим, что из (8) непосредственно следует, что условие: $x_{гр}(t_0) = x_{гр}^{зад}$, $\dot{\phi}(t_0) = 0$ – соответствует устойчивому состоянию замкнутой системы управления, а $x_{гр}(t_0) \neq x_{гр}^{зад}$, $\dot{\phi}(t_0) = 0$ – началу движения груза в сторону целевой точки. Запишем уравнение (8) в виде

$$\ddot{x}_{гр} - a_{M1}\dot{x}_{гр} - a_{M0}x_{гр} \approx -a_{M0}\tilde{x}_{гр}^{зад}, \quad (10)$$

где $\tilde{x}_{гр}^{зад} = x_{гр}^{зад} + (a_{M1}/a_{M0})l\dot{\phi}$ означает «зону притяжения» с центральной точкой $x_{гр}^{зад}$ для переменной $x_{гр}$ в указанном движении в силу очевидной ограниченности величины $|l\dot{\phi}| \approx |\dot{x}_{гр} - \dot{x}|$ и устойчивости назначенного эталона.

Нахождение груза внутри этой зоны можно также описать неравенством $|x_{гр} - x_{гр}^{зад}| \leq |(a_{M1}/a_{M0})l\dot{\phi}|$. Для его анализа запишем (8) через переменную x с учетом (5)

$$\ddot{x} - a_{M1}\dot{x} - a_{M0}(x - x_{гр}^{зад}) \approx -l(\ddot{\phi} + \omega_M^2\phi).$$

Известно (см., например, [15]), что угловое движение идеального маятника (будем им считать груз на подвесе с перемещающимся основанием) описывается равенством $\ddot{\phi} + \omega_0^2\phi \equiv 0$, где ω_0 – текущая собственная частота колебаний груза. Вычтем из правой части последнего равенства указанный нуль, умноженный на $(-l)$, найдем, что замкнутая система управления также описывается равенством

$$\ddot{x} - a_{M1}\dot{x} - a_{M0}(x - x_{гр}^{зад}) \approx l(\omega_0^2 - \omega_M^2)\phi. \quad (11)$$

Отсюда следует, что при условии $\omega_M < \omega_0$, в силу устойчивости левой части этого равенства, движение тележки будет в ту же сторону от $x_{гр}^{зад}$, в

какую при колебании отклонился груз (см. рис. 1), причем с темпом, не превышающим темп изменения ϕ . А это значит, что поведение тележки направлено на гашение колебаний. То есть при колебании груза внутри указанной выше «зоны притяжения» $\dot{\phi} \rightarrow 0$.

А это по (8) дает $x_{\text{тр}} \rightarrow x_{\text{тр}}^{\text{зад}}$.

Таким образом, уравнения (8)–(11) и представленные логические рассуждения указывают (при условии $\omega_M < \omega_0$) на диссипативное поведение замкнутой системы управления на начальном этапе движения груза в плане приближения к свойствам назначенного устойчивого эталона и асимптотически устойчивое состояние системы в конечной целевой точке: $\dot{\phi} \rightarrow 0, x_{\text{тр}} \rightarrow x_{\text{тр}}^{\text{зад}}$. Последнее также влечет устойчивость состояния в целевой точке всей системы управления краном.

В качестве ω_0 при назначении ω_M можно использовать собственную частоту математического маятника с неподвижным основанием, т.к. вышеприведенные рассуждения строились для области целевой точки груза. Известно, что значение последней определяется как $\sqrt{g/l}$. Отсюда, с учетом ошибки определения длины подвеса, следует смысл приведенной выше зависимости для ω_M .

Полученный закон управления (7) построен при условиях, что параметры объекта управления (a_1^V, a_2^V, a_3^V) известны. Однако по условию решаемой задачи они не определены. Для поиска оценок указанных параметров по (4) в текущем времени используем алгоритм идентификации с лучшими идентифицирующими свойствами, способный оценивать переменные по времени – рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [17]:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + \mathbf{P}_i \mathbf{y}_i \varepsilon_i; \quad \varepsilon_i \triangleq z_i - \mathbf{y}_i^T \hat{\theta}_{i-1}; \\ \mathbf{P}_i = \left[\mathbf{P}_{i-1} - \mathbf{P}_{i-1} \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^T \mathbf{P}_{i-1} (1 + \mathbf{y}_i^T \mathbf{P}_{i-1} \mathbf{y}_i)^{-1} \right] / \beta; \\ \mathbf{P}_0 = \vartheta \mathbf{E}_2; \quad \beta < 1; \quad \beta \rightarrow 1, \end{cases} \quad (12)$$

где индекс $i = 1, 2, 3, \dots$ обозначает дискретные моменты времени с шагом Δt ; $\hat{\theta}_i \triangleq [\hat{a}_{2i}^V, \hat{a}_{3i}^V]^T$ – вектор искомых оценок; верхний индекс «Т» означает транспонирование; $\mathbf{y}_i = [\phi_i, 1]^T$ – вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам; ε_i – невязка идентификации; z_i – отклик объекта, в данном случае это $(\ddot{x}_{\text{тр}} - \hat{a}_1^V \dot{\phi})$; оценка \hat{a}_1^V будет назначаться постоянной в силу свойств замкнутой адаптивной системы управления, построенной на «упрощенных» условиях адаптируемости [13]? и известных диапазонов этой оценки [см. (4)]; \mathbf{P}_i – матричный коэффициент усиления алгоритма (2×2); β – назначаемый фактор забывания прошедших

измерений для слежения за изменяющимися во времени искомыми параметрами; ϑ – большое положительное число, определяющее начальную скорость изменения оценок параметров; \mathbf{E}_2 – единичная (2×2) матрица.

Закон управления с учетом оцениваемых параметров объекта управления вместо их действительных величин в отличии от (7) имеет вид:

$$\hat{T} \dot{V}_{\text{упр}} + V_{\text{упр}} = -a_{M1}^{-1} \left[a_{M0} (\hat{x}_{\text{тр}} - x_{\text{тр}}^{\text{зад}}) - \hat{a}_2^V \phi - \hat{a}_3^V \right], \quad (13)$$

где $\hat{T} = -\hat{a}_1^V / a_{M1}$, $\hat{x}_{\text{тр}} = \int_0^t V_{\text{упр}}(t) dt + \hat{l}_{30\%} \phi$.

Как показано в работах [12, 13], требование к точности оценки \hat{a}_1^V может быть очень слабым (соответствует «упрощенным» условиям адаптируемости) и сводится к соотношениям

$$\text{sign}(\hat{a}_1^V) = \text{sign}(a_1^V); \quad |a_1^V|/2 \leq \hat{a}_1^V \leq |\hat{a}_1^V|_{\text{max}}; \quad d\hat{a}_1^V/dt \rightarrow 0, \quad (14)$$

где $|\hat{a}_1^V|_{\text{max}} \geq 2|a_1^V|$ – верхнее ограничение указанной оценки, которое определяется экспериментально по качеству результирующего управления. Поэтому эта оценка выбрана постоянной с экспериментальным выбором максимального ее значения.

Для того чтобы распространить выводы по устойчивости замкнутой системы управления при точном законе управления (7) на систему управления с реальным законом (13), выполним следующее. В силу быстрой сходимости невязки идентификации в алгоритме (12) буквально с первых шагов работы алгоритма (доказательство см. в [13]) уравнение объекта управления (4) можно переписать как

$$\ddot{x}_{\text{тр}} \approx \hat{a}_1^V \dot{\phi} + \hat{a}_2^V \phi + \hat{a}_3^V.$$

Подставляя сюда закон управления (13), мы получим те же рассуждения и выводы, которые приведены для зависимостей (8)–(11), что доказывает устойчивость замкнутой системы управления с законом управления, построенным на оценках.

Результаты моделирования

Моделирование системы управления выполнялось в программной среде MatLab/Simulink. Параметры объекта управления принимались в соответствии с разработанным макетом мостового крана [14]: $m_{\eta} = 0,85$ кг; длина троса во время конкретного исследования неизменна. На макете мостового крана для измерения переменных $\dot{\phi}$ и $\ddot{x}_{\text{тр}}$ используется MEMS гироскоп-акселерометр (GY-521, построенный на микромеханическом чипе MPU-6000/MPU-6050, измеряющем угловые скорости и ускорения по трем осям [18]), установленный на трос выше на 5 см места крепления троса с грузом (около груза). Сигнал ϕ определялся интегрированием измеренного $\dot{\phi}$. Определение переменной x осуществляется по количеству управляющих импульсов шагового двигателя (привода тележки), а \dot{x} – интегрированием измеренного \ddot{x} с помощью

второго MEMS гироскоп-акселерометра, установленного на тележку. В соответствии с этим шумы измерения переменных ϕ , $\ddot{x}_{гр}$ и \ddot{x} считались гауссовскими центрированными, со среднеквадратичным отклонением соответственно: 0,05 град/с; 0,1 м/с².

Параметры эталонной модели (4): $\xi_M = 0,9$; $\omega_M = 2,28 \text{ с}^{-1}$ (собственная частота неподвижного подвеса при его длине 0,55 м: $\sqrt{9,81/0,55} \approx 4,2 \text{ с}^{-1}$). Заданное расстояние $x_{гр}^{зад} = 0,5$ м. Параметры алгоритма идентификации (12) и закона управления (13): $\Delta t = 0,01 \text{ с}$; $\theta = 10$; $\beta = 0,99$.

Для анализа свойств парирования внешних возмущений смоделировано воздействие ветра на

подвешенный груз. Это воздействие начинается в момент времени 7,5 с, имеет ступенчатый вид и пропорционально массе груза.

В результате предварительных исследований системы управления и на основании соотношений, экспериментально была определена величина $\bar{a}_1^V = \left| \bar{a}_1^V \right|_{\max} \equiv 10a_1^V$ (другие значения этой оценки из диапазона (14) практически не изменяют качества управления).

На рис. 2 представлен результат исследования функционирования системы управления при параметрах груза: $m_2 = 0,85 \text{ кг}$, $J = 0,00204 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $l = 0,55 \text{ м}$.

На рис. 3 представлен результат исследования функционирования системы управления при параметрах груза: $m_2 = 2 \text{ кг}$, $J = 0,0048 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $l = 0,8 \text{ м}$.

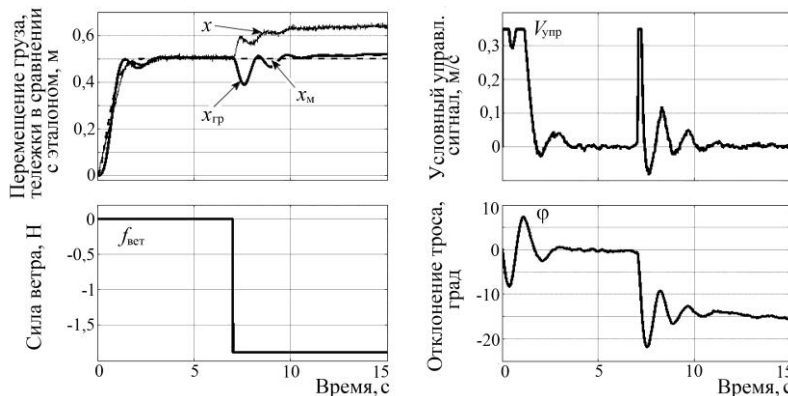


Рис. 2. Переходный процесс системы управления ($m_2 = 0,85 \text{ кг}$, $J = 0,00204 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $l = 0,55 \text{ м}$)

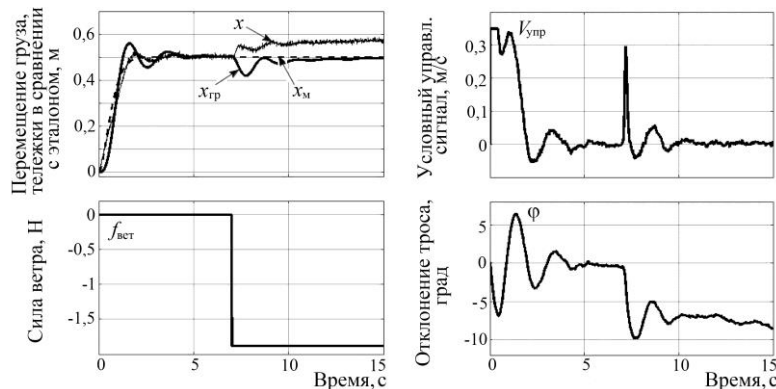


Рис. 3. Переходный процесс системы управления ($m_2 = 2 \text{ кг}$, $J = 0,0048 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $l = 0,8 \text{ м}$)

Как видим, при значительных изменениях параметров системы управления получаем быстрое гашение угловых колебаний груза и доставку его в целевую точку (время переходного процесса около 3 с), а также парирование внешнего возмущения.

Подобные результаты были получены при других параметрах груза, длины подвеса груза и внешних возмущениях.

Заключение

Представлена модернизация адаптивного закона управления мостового крана с реализацией управления по скорости. Доказана устойчивость замкнутой

системы управления. Это позволяет упростить алгоритмическое обеспечение системы управления, в частности, за счет уменьшения количества оцениваемых параметров алгоритмом идентификации.

Результаты исследования показывают высокую эффективность предложенной системы управления. Данный закон управления обеспечивает точное перемещение груза за короткий промежуток времени, гасит колебания груза, которые возникают во время ускорения и торможения тележки, и способен парировать внешнее возмущение. При этом система требует минимальных начальных настроек.

Так как данная модификация подхода адаптивного управления с прямым отслеживанием за перемещением груза показала высокое качество управления при моделировании в программной среде Matlab Simulink, то следующим шагом работы в данном направлении является исследование системы управления на макете мостового крана [14].

Литература

1. Корятов М.С. Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана / М.С. Корятов, В.С. Щербаков, Е.О. Шершнева // Вестник СибАДИ. – 2017. – № 1(53). – С. 12–19.
2. Рогова Н.С. Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном / Н.С. Рогова, В.Д. Юркевич // Сб. науч. трудов НГТУ. – 2015. – № 3. – С. 43–54.
3. Саблина Г.В. Разработка алгоритма стабилизации системы «подвешенный груз» / Г.В. Саблина, Д.И. Ходакова // Сб. науч. трудов НГТУ. – 2009. – № 3(57). – С. 33–40.
4. Воевода А.А. Синтез регулятора для системы «перевернутый маятник–тележка» / А.А. Воевода, В.В. Вороной, Е.В. Шоба // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 4(49). – С. 161–165.
5. Антипов А.С. Система стабилизации положения тележки крана с использованием сигмоидальной функции / А.С. Антипов, С.А. Краснова // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 10. – С. 609–614.
6. Петренко Ю.Н. Исследование работы крана с контроллером нечёткой логики на основе трехмерной имитационной модели / Ю.Н. Петренко, С.Э. Алави, С.В. Александровский // Энергетика. Белорус. нац. техн. ун-т. – 2011. – № 3. – С. 20–25.
7. Ухоботов В.И. Стабилизация математического маятника с основанием на колесе с помощью нечёткого алгоритма управления / В.И. Ухоботов, В.С. Величко // Вестник ЮУрГУ. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 18–23.
8. Chen Z.M. Intelligent anti-swing control for bridge crane / Z.M. Chen, W.J. Meng, J.G. Zhang // Journal of Central South University. – 2012. – Vol. 19, No. 10. – P. 2774–2781.
9. Ngo Q.H. et al. Fuzzy sliding mode control of container cranes // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2015. – Vol. 13, No. 2. – P. 419–425.
10. Fang Y. et al. A motion planning-based adaptive control method for an underactuated crane system // IEEE Transactions on control systems technology. – 2012. – Vol. 20, No. 1. – P. 241–248.
11. Круглов С.П. Адаптивное управление перемещением груза мостовым краном с идентификационным алгоритмом / С.П. Круглов, С.В. Ковыршин, И.Е. Ведерников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 4. – С. 114–122.
12. Круглов С.П. Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза / С.П. Круглов, Д.Н. Аксаментов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 21(12). – С. 682–688.
13. Круглов С.П. Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном. – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2012. – 125 с.
14. Аксаментов Д.Н. Установка по исследованию алгоритмов успокоения колебаний груза мостового крана / Д.Н. Аксаментов, С.П. Круглов, С.В. Ковыршин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т. 2. – С. 288–292.
15. Черноусько Ф.Л. Методы управления нелинейными механическими системами / Ф.Л. Черноусько, И.М. Ананьевский, С.А. Решмин. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
16. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: учеб. пособие для вузов. – СПб.: Лань, 2015. – 624 с.
17. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.
18. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013, 54 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.invensense.com>, свободный (дата обращения: 14.11.2019).

Круглов Сергей Петрович

Д-р техн. наук, проф. каф. автоматизации производственных процессов Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС)
Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, Россия, 664074
ORCID: 0000-0001-9241-3352
Тел.: 8-950-111-83-69
Эл. почта: kruglov_s_p@mail.ru

Аксаментов Дмитрий Николаевич

Аспирант каф. автоматизация производственных процессов ИрГУПС
Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, Россия, 664074
Тел.: 8-950-061-82-09
Эл. почта: Gaastra104@mail.ru

Kruglov S.P., Aksamentov D.N.

Adaptive control of the overhead crane by the trolley speed

A method is proposed for automatic control of the speed of an overhead-type crane trolley with direct tracking of the horizontal movement of load in conditions of current uncertainty of load parameters and external disturbances. The purpose of the control is to find the precise positioning of the transported cargo with the damping of its pendulum oscillations and the parrying of external disturbances. The dynamics of an overhead crane when moving a trolley along one axis is described. The proposed control method is based on an adaptive control scheme with an identifier and an implicit reference model using «simplified» adaptability conditions. The stability of a closed control system is proved and the conditions for this are determined. For the current identification of load parameters, the recursive least squares method with a forgetting factor is used. This control method was developed specifically for research and debugging on an experimental layout, so all the parameters of the crane and load were approximated to the layout during calculations. The results of computer simulation the proposed control method with different mass-inertial properties of the load, the length of its suspension and perturbations in the Matlab Simulink software environment are presented. The results showed the high efficiency of the proposed adaptive control system. It ensures accurate movement of the load in a short period of time, prevents the load from swinging during acceleration and braking of the cart, and is also able to fend off external disturbances, for example, the impact of

wind. The developed approach can be recommended for any crane installations using a suspended load.

Keywords: adaptive control system, overhead crane, control law, parrying external disturbances, identification algorithm, stability of a closed control system.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-86-92

References

1. Korytov M.S., Shherbakov V.S., Shershneva E.O. *Obosnovanie znachenij koeffitsientov reguljatorov gasheniya kolebanij gruzu mostovogo krana* [Substantiation of the values of the coefficients of the regulators for damping the oscillations of the load of the overhead crane], *Vestnik SibADI*, 2017, no. 1(53), pp. 12–19 (in Russ.).

2. Rogova N.S., Jurkevich V.D. *Razrabotka algoritmov upravleniya dlya peremeshheniya gruzu portal'ny'm kranom* [Development of control algorithms for moving load by a portal crane]. *Sbornik nauchnyh trudov NGTU*, 2015, no. 3, pp. 43–54 (in Russ.).

3. Sablina G.V., Hodakova D.I. *Razrabotka algoritma stabilizacii sistemy «podveshennyj gruz»* [Development of an algorithm for stabilizing the "suspended load" system]. *Sbornik nauchnyh trudov NGTU*, 2009, no. 3(57), pp. 33–40 (in Russ.).

4. Voevoda A.A., Voronov V.V., Shoba E.V. *Sintez reguljatora dlya sistemy «perevernutyj mayatnik – telezhka»* [Synthesis of the controller for the "inverted pendulum-trolley" system], *Nauchnyj vestnik NGTU*, 2012, no. 4(49), pp. 161–165 (in Russ.).

5. Antipov A.S., Krasnova S.A. *Sistema stabilizacii polozheniya telezhki krana s ispol'zovaniem sigmoidal'noj funkicii* [System for stabilizing the position of the crane truck using the sigmoid function]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 10, pp. 609–614 (in Russ.).

6. Petrenko Yu.N., Alavi S.E., Aleksandrovskij S.V. *Issledovanie raboty krana s kontrollerom nechyotkoj logiki na osnove trexmernoj imitacionnoj modeli* [Investigation of crane operation with odd logic controller based on 3D simulation model], *Energy*, Belorusskij nacional'nyj tehnikeskij universitet, 2011, no. 3, pp. 20–25 (in Russ.).

7. Uxobotov V.I., Velichko V.S. *Stabilizaciya matematicheskogo mayatnika s osnovaniem na kolese s pomoshh'yu nechyotkogo algoritma upravleniya* [Stabilisation of the mathematical pendulum with the base on the wheel using an odd control algorithm]. *Vestnik YuUrGU*, 2014, vol. 14 no. 2, pp. 18–23 (in Russ.).

8. Chen Z.M. Intelligent anti-swing control for bridge crane / Z.M. Chen, W.J. Meng, J.G. Zhang, *Journal of Central South University*, 2012, vol. 19, no. 10, pp. 2774–2781.

9. Ngo Q.H. and at. Fuzzy sliding mode control of container cranes. International. *Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 419–425.

10. Fang Y. and at. A motion planning-based adaptive control method for an underactuated crane system. *IEEE Transactions on control systems technology*, 2012, vol. 20, no. 1, pp. 241–248.

11. Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Vedernikov I.E. *Adaptivnoe upravlenie peremeshheniem gruzu mostovym kranom s identifikacionnym algoritmom* [The adaptive control of movement of cargo by the overhead crane with an identification algorithm]. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*, 2017, no. 4, pp. 114–122 (in Russ.).

12. Kruglov S.P., Aksamentov D.N. *Metod adaptivnogo upravleniya mostovym kranom s pryamy'm otslezhivaniem peremeshheniya gruzu* [A method of adaptive control of an overhead crane with direct tracking of the load movement]. *Mekhatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2020, no. 21(12), pp. 682–688 (in Russ.).

13. Kruglov S.P. *Usloviya adaptiruемости sistem upravleniya s identifikatorom i e'talonom* [The terms of the adaptability of control systems with an identifier and a reference model], Monograph. Saarbrücken, Deutschland, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012, 125 p. (in Russ.).

14. Aksamentov D.N., Kruglov S.P., Kovyrshin S.V. *Ustanovka po issledovaniyu algoritmov uspokoeniya kolebanij gruzu mostovogo krana* [Installation for investigation of bridge crane load vibration calming algorithms]. *Transport infrastructure of the Siberian region*, 2019, vol. 2, pp. 288–292 (in Russ.).

15. Chernous'ko F.L., Anan'evskij I.M., Reshmin S.A. *Metody upravleniya nelinejny'mi mexanicheskimi sistemami* [Control methods of nonlinear mechanical systems]. Moscow, Fizmatlit, 2006, 328 p. (in Russ.).

16. Pervozvanskij A.A. *Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory course], textbook for universities. Saint-Petersburg, Lan', 2015. 624 p. (in Russ.).

17. Ljung L. *System Identification: Theory for the User*. University of Linköping, Sweden, 1991, 432 p.

18. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013, 54 p. Available at: <http://www.invensense.com>, free (Accessed: November 14, 2019).

Sergey P. Kruglov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Automation of production operations,
Irkutsk State Transport University (ISTU)
15, Chernyshevskogo, Irkutsk, Russia, 664074
ORCID: 0000-0001-9241-3352
Phone: +7-950-111-83-69
Email: kruglov_s_p@mail.ru

Dmitriy N. Aksamentov

Postgraduate student, Department of Automation
of production operations, ISTU
15, Chernyshevskogo, Irkutsk, Russia, 664074
Phone: +7-950-061-82-09
Email: Gaastra104@mail.ru

УДК 004: 622.324

Н.А. Соловьев, А.Ф. Валеев

Развитие модели живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин

Анализируется развитие методического обеспечения автоматизированной системы научных исследований живучести обводненных газовых скважин. Предложена модель живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин, включающая модель «пласт-скважина», модель неблагоприятных последствий обводнения, модель физических процессов, модель последствий обводнения, модель средств обеспечения живучести, модель развития последствий обводнения, блок расчета показателей живучести и базы данных для работы с исходными данными и результатами моделирования. На основе анализа существующих подходов к оценке живучести технических систем разработан коэффициент живучести системы добычи газа в условиях обводнения, зависящий от свойств результативности, ресурсоемкости при использовании технологий борьбы с обводнением на объектах добычи газа. Предложен критерий выбора наилучшего средства обеспечения живучести обводненной газовой скважины, учитывающий характеристики пласта, конструкцию и оборудование скважины, дебит газа.

Ключевые слова: автоматизация, научные исследования, газовая скважина, обводнение, живучесть, результативность, ресурсоемкость, моделирование.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-93-100

Добыча продукции многих газоконденсатных месторождений сопровождается падением пластового давления и появлением внешних неблагоприятных воздействий, уровень которых превышает проектные условия эксплуатации системы добычи, например обводнение скважин.

В работе [1] авторами предложено характеризовать влияние неблагоприятного воздействия обводнения скважин на систему добычи газа свойством живучести. Дано определение понятия живучести системы добычи газа S – свойство, заключающееся в способности скважины поддерживать в допустимых пределах проектные значения эксплуатационных показателей в условиях, не предусмотренных регламентом нормальной эксплуатации. Доказана необходимость разработки автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин.

В статье предлагается развитие методического обеспечения АСНИ живучести обводненных газовых скважин. Компоненты методического обеспечения представляют собой документы, содержащие описание терминов, теории, методов, способов, моделей, алгоритмов, нормативов, стандартов и прочих данных, которые обеспечивают методологию научных исследований в подсистемах АСНИ [2].

Модель живучести системы добычи газа в условиях обводнения

Надежность определяет работу систем в условиях нормальной эксплуатации. В ГОСТ [3] надежность – свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Проведенный анализ зарубежной и отечественных источников литературы [4–16] показал, что живучесть как понятие давно известно в технике и используется на практике при проектировании различных технических систем. При этом до настоящего

времени не создано развитой теории живучести, которая содержала бы, как и теория надежности, технические результаты, позволяющие оценивать его количественно и предоставлять практические рекомендации по обеспечению живучести разработчику сложных систем [1].

Общая модель живучести системы представлена на рис. 1, а [4], где МНВ – модель развития неблагоприятного воздействия, ПФ – значения поражающих факторов, неблагоприятных воздействий, МРС – модель изменения работоспособности системы, МПНВ – модель процессов противодействия неблагоприятным воздействиям, ПЖ – значения показателей живучести.

Значительный вклад в исследование надежности и живучести внесли отечественные ученые Г.Н. Черкесов и А.О. Недосекин [5–7], которые представляют живучесть как свойство системы сохранять и восстанавливать способность к выполнению основных функций в заданном объеме в течение заданной наработки при изменении структуры системы и (или) алгоритмов и условий ее функционирования вследствие не предусмотренных регламентом нормальной работы внешних неблагоприятных воздействий. В [8] приводится дополнение и уточнение определения с учетом свойств функциональной живучести и ее частного случая – структурной живучести. Показатели живучести распределяются на две группы. В первой группе – показатели для оценки живучести по состоянию системы, во второй – по результатам выполнения задания [6]. Показатели второй группы используются для оценки способности системы как противостоять неблагоприятному воздействию, так и выполнить установленное задание. В [8] предложены вероятностные и нечетко-логические модели функциональной живучести технических систем. Оценивается живучесть системы после n -кратного неблагоприятного воздействия. Данный подход требуют адаптации для воз-

возможности оценки живучести объектов добычи газа с учетом обводнения.

В.А. Черных и В.В. Черных [15] рассматривают живучесть системы добычи газа как геомеханическую и гидродинамическую живучесть, при этом не учитывается влияние обводнения на объекты добычи газа.

Поэтому существующий методический аппарат не может быть использован для оценки живучести системы добычи газа и требует развития с учетом особенностей объекта исследования.

Таким образом, объектом исследования является живучесть объектов добычи газа газоконденсатных месторождений в условиях обводнения; предметом – методическое обеспечение исследования живучести объектов добычи газа; границы исследования – рациональное использование пластовой

энергии на подъем газа за счет своевременного введения различных технологий борьбы с обводнением.

Цель исследования: разработка модели живучести системы добычи продукции газоконденсатных месторождений, позволяющей поддерживать приближенный к проектному уровень добычи газа за счет выбора технологий борьбы с обводнением и периода их использования.

Задачи исследования, которые необходимо решить для достижения цели:

1. Выполнить системный анализ проблем обеспечения живучести объектов добычи газа газоконденсатных месторождений в условиях обводнения.
2. Разработать математический аппарат для оценки показателей живучести объектов добычи газа.
3. Разработать критерий выбора технологий борьбы с обводнением системы добычи газа.

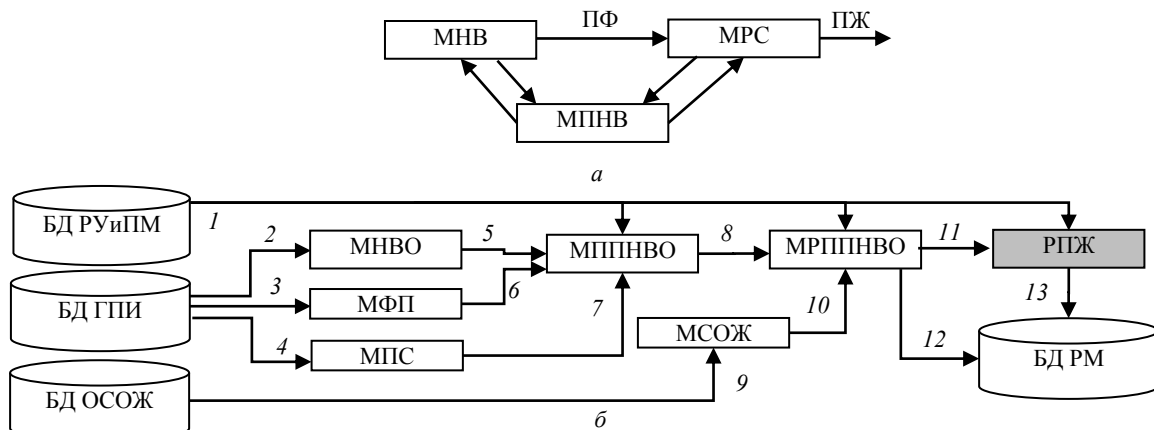


Рис. 1. Модель живучести: *a* – общая модель живучести системы [4];

б – модель живучести объектов добычи газа в условиях обводнения;

- 1* – технологические ограничения, проектные значения показателей добычи углеводородов, исходные экономические данные (цены углеводородов, ресурсов и др.); *2* – геолого-промысловые данные: *Prresl* – параметры водоносного пласта, свойства и состав пластовой жидкости; *3* – геолого-промысловые данные: свойства и состав газа; *4* – геолого-промысловые данные: *Prresg*, *Prw* – параметры газонасыщенного пласта, конструкции и оборудования скважины, накопленная добыча газа *Og*, *Ol* – накопленная добыча газа и жидкости, *Pres*, *Pbh*, *Pwhl*, *Pwha* – давление пластовое статическое, давление на забое, на устье (трубное и затрубное); *5* – параметры притока жидкости к забою скважины; *6* – характеристики движения газового потока по стволу скважины; *7* – параметры притока газа, показатели работы системы добычи газа без обводнения; *8* – характеристики газожидкостного потока по стволу скважины, показатели работы системы добычи газа с учетом неблагоприятного воздействия обводнения; *9* – параметры оборудования СОЖ, *10* – характеристики СОЖ; *11* – фактические, проектные и расчетные значения показателей системы добычи газа с СОЖ и без СОЖ; *12* – расчетные значения показателей системы добычи газа с СОЖ и без СОЖ; *13* – показатели живучести системы добычи газа

Методы исследования: системный анализ, теория систем, теория надежности и живучести, теория разработки месторождений природного газа, прогностическое моделирование.

В [1] предложена концепция живучести объектов добычи газа. Ее основой является система моделирования процессов добычи продукции газоконденсатных месторождений, учитывающая технологии борьбы с обводнением – средства обеспечения живучести (СОЖ) [5] и период их использования. Подбор СОЖ позволит продлить живучесть скважины – поддерживать уровень добычи газа, близкий к проектному значению.

В рамках создания АСНИ живучести объектов добычи газа [1] на основе общей модели (см. рис. 1, *a*) и подхода, предложенного Г.Н. Черкесовым [5, 6], разработана модель живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин (см. рис. 1, *б*).

Модель включает следующие компоненты:

- модель неблагоприятного воздействия обводнения (МНВО), применяется для задания неблагоприятных воздействий обводнения на газовую скважину;
- модель физических процессов (МФП), используется для анализа переходных процессов в системе добычи газа после неблагоприятных воздей-

ствий (изменение динамического уровня жидкости) и описывает траекторию процесса функционирования;

– модель «пласт–скважина» (МПС), описывает техническую и функциональную структуры компонентов системы «пласт–скважина»;

– модель первичных последствий неблагоприятного воздействия обводнения (МППНВО), получается путем взаимодействия МПС, МФП и МНВО. В МФП вводятся возмущения, связанные с неблагоприятным воздействием обводнения, и рассматриваются переходные процессы в добыче газа без учета СОЖ;

– модель СОЖ (МСОЖ), отражает характеристики технологий борьбы с обводнением. МСОЖ позволяет задать оснащение определенной компоновкой одной из технологий борьбы с обводнением на скважине: установки электроцентробежного насоса (УЭЦН), установки винтового штангового насоса (УВШН), плунжер-лифта, газлифта, концентрической лифтовой колонны (КЛК) и др.;

– модель развития первичных последствий неблагоприятного воздействия обводнения (МРППНВО), получается в результате сочетания МППНВО с МСОЖ и позволяет найти траекторию управляемого процесса с учетом действий СОЖ;

– блок расчета показателей живучести (РПЖ) системы добычи газа при различных вариантах использования СОЖ;

– база данных рекомендуемых уставок и планов мероприятий (БД РУиПМ);

– база данных геолого-промысловой информации (БД ГПИ);

– база данных оборудования СОЖ (БД ОСОЖ);

– база данных результатов моделирования (БД РМ).

Информационную основу АСНИ составляет база геолого-промысловой информации месторождения, в которой содержатся данные по скважине, результаты геофизических, газогидродинамических, промысловых и лабораторных исследований, данные технологических режимов работы, геолого-технических отчетов, конструкции и оборудования, геологического строения, вскрытых участков пласта, траектории, простоях скважин, местоположении, свойствах и составе пластового флюида и другая информация [17].

Для ведения и анализа содержимого базы данных разработан программный комплекс «Скважина» (ООО «ВолгоУралНИПИГаз»). Программный комплекс позволяет получать оперативный доступ к каталогу документов по проведенным геолого-промысловым и лабораторным исследованиям, информации о распределении давления, температуры и плотности продукции по стволу скважины, передавать данные для интегрированной геолого-технологической модели месторождения, представлять в виде графиков историю изменения устьевых и забойных давлений скважины в статике и динамике, проводить расчеты забойного давления «сухих» и обводненных газовых скважин с учетом их конструктивных и геологических особенностей, прово-

дить анализ разработки месторождений, визуализировать и осуществлять выгрузку данных в заданном формате (таблиц, графиков, диаграмм, рисунков).

Разработана МРППНВО, которая используется для проведения узлового и системного анализа; определения потерь давления и получения характеристик работы скважин; подбора оптимального диаметра труб; моделирования СОЖ на скважинах; проверки и прогноза параметров технологических режимов работы скважин; расчета специальных таблиц VFP, применяемых для задания системы добычи и представляющих собой зависимость устьевого давления скважины от забойного для различных параметров работы скважины с учетом актуальной компоновки оборудования, хранимых в базе данных [17, 18].

Однако в АСНИ отсутствует математический аппарат, необходимый для оценки показателей живучести системы добычи газа (см. серый блок на рис. 1, б).

Показатели живучести системы добычи газа

Живучесть объектов добычи газа предлагается оценивать аналогично подходу, который используется для внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем [16], по трем показателям: результативности, ресурсоемкости и длительности использования СОЖ в условиях неблагоприятных воздействий, уровень которых превышает проектные [1]. При этом предполагается, что система добычи газа является надежным техническим объектом: конструкция и все оборудование исправны, эксплуатация осуществляется в соответствии со всеми установленными требованиями промышленной безопасности.

Коэффициент живучести системы добычи газа определяется свойствами системы в выражении $S = f(Y_p, Y_r, Y_d)$.

Результативность Y_p обуславливается объемом добытого газа и характеризует процесс добычи газа.

Ресурсоемкость Y_r характеризует эффективность использования ресурсов в процессе добычи газа в условиях неблагоприятных воздействий.

Длительность использования СОЖ Y_d характеризует период времени применения СОЖ в условиях неблагоприятных воздействий.

Ресурсозатраты R – ресурсы, необходимые для эксплуатации скважин (в том числе для реализации СОЖ) и функционирования АСНИ за заданный период времени.

Определены ресурсы для реализации системы добычи газа с СОЖ и АСНИ (таблица) [16].

Проектные значения показателей (индекс pr) – значения показателей работы системы добычи газа согласно технологической проектной документации на разработку месторождения (с проектным уровнем неблагоприятного влияния обводнения скважин или без учета обводнения).

Расчетные (прогнозные) значения показателей (без индекса) – прогнозные значения, рассчитанные с помощью АСНИ с учетом неблагоприятных воздействий, уровень которых превышает проектные.

Используемые ресурсы

Тип ресурса	Описание
Сырьевой	Объем газлифтного газа для закачки
Структурно-параметрический	Вычислительный кластер АСНИ, система хранения данных, автоматизированная система управления технологическим процессом, контрольно-измерительные приборы, инфраструктура для реализации технологии добычи с УЭЦН, УШВН, автоматики плунжер-лифта, КЛК, инфраструктура для очистки и утилизации пластовой жидкости
Энергетический	Электропитание УЭЦН, УВШН, автоматики плунжер-лифта, КЛК, компрессоров газлифтного газа и др.
Технический	Скважины, промысловые шлейфы, система предварительной подготовки углеводородного сырья
Технологический	Расход ингибиторов коррозии и гидратообразования и др.
Информационный	Необходимая информация для контроля, мониторинга и управления технологическим процессом добычи, структура ее хранения, дискретность обновления
Временной	Время, необходимое для выполнения операции, время для принятия управленческих решений
Трудовой	Количество специалистов и руководителей для обслуживания системы (операторы, отдел моделирования, геологи, разработчики месторождений, технологи, специалисты по автоматизации, инженеры сервисной службы)

Фактические значения показателей (индекс f) – значения показателей работы системы добычи газа согласно геолого-технической отчетной документации на определенный момент времени, характеризуют историю работы скважины.

Разработан математический аппарат для определения коэффициента живучести скважины

$$\begin{cases} S = 0, Q_g < Q_{g \min}; \\ S = 1, Q_g = Q_{gpr}; \\ S = Y_p(Q_g \times A) / \overline{Y_r(V_l, E(t))} / \overline{Y_d(E(t))} / \overline{\Delta P_{res}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $A = \left(\begin{matrix} Pr_{res}, Pr_w, Pr_{fl}, Pr_{res}(Q_{gim}), \\ P_{bh}(P_{wh}, Q_l, P_{wh}), \\ T_{res}, T_{bh}, T_{wh}, H_{dyn} \end{matrix} \right); \overline{Y_r}, \overline{Y_d}, \overline{\Delta P_{res}}$ –

нормализованные относительно проектных значений расчетные значения показателей: ресурсоемкости, времени эксплуатации скважины и изменения пластового давления; Q_l, Q_g – дебиты пластовой жидкости и газа; Pr_{res}, Pr_w, Pr_{fl} – параметры пласта, конструкции и оборудования скважины и шлейфа; V_l – объем пластовой жидкости; T_{res}, T_{bh}, T_{wh} – температура в пласте, в призабойной зоне и на устье; H_{dyn} – динамический уровень жидкости в пространстве между эксплуатационной колонной и насосно-компрессорными трубами; $E(t)$ – параметры СОЖ E во времени t .

Если дебит газа меньше рентабельного дебита газа, то живучесть скважины равна нулю.

Если дебит газа соответствует проектному дебиту, то живучесть скважины максимальная и равна единице.

Иначе живучесть рассчитывается по третьей зависимости в системе уравнений (1).

Максимальная накопленная добыча газа «сухой» скважины может быть равна извлекаемым запасам газа Z , дренируемым скважиной.

На рис. 2 представлена динамика коэффициента живучести скважины: S_{pr} – проектного, S_f – без использования СОЖ, S – с управляющим воздействием (применением СОЖ).

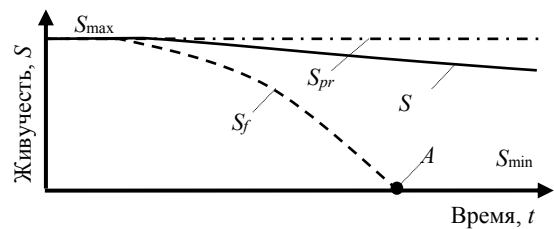


Рис. 2. Динамика коэффициента живучести скважины

Без применения СОЖ из-за самозадавливания пластовой жидкостью коэффициент живучести скважины может снизиться до значения S_{min} , при котором эксплуатация скважины становится нерентабельной.

Минимальный рентабельный (промышленный) дебит газа $Q_{g \min}$ – суточная добыча газа, обеспечивающая компенсацию ресурсозатрат на эксплуатацию скважины с СОЖ, т.е. равны чистому доходу от реализации добытой продукции $M: R = M$.

Накопленная добыча газа Q_g – объем газа, добытый из скважины за определенный период времени.

Фактическое (расчетное) значение показателя результативности системы добычи газа $Y_{pf}(Y_p)$ определяется как отношение фактического (прогнозного) накопленного объема добываемого газа за время t $Q_{gf}(Q_g)$ к проектному Q_{gpr} : $Y_{pf} = Q_{gf}(t) / Q_{gpr}(t)$, $Y_p = Q_g(t) / Q_{gpr}(t)$.

Ресурсоемкость Y_r определяется как отношение ресурсозатрат и объема добытого газа за время t : $Y_r = R(t) / Q_g(t)$.

Длительность использования СОЖ: $Y_d = \Delta t$.

В результате обводнения скважины происходит ухудшение фильтрационных свойств пласта.

На рис. 3 представлена динамика показателей работы скважины без учета обводнения и с применением СОЖ при обводнении.

Показатели скважины включают: S – коэффициент живучести, P_{res} – пластовое давление, Q_{gim} – накопленная добыча газа; Q_{wim} – накопленная добыча пластовой жидкости, R – ресурсозатраты. В момент времени t_0 начинается эксплуатация скважины, в t_w – начинается обводнение скважины, в t_{cr} – окон-

чание работы скважины фонтаном, начало эксплуатации скважины с первой компоновкой СОЖ, в $t_1 \dots t_n$ – заканчивается период использования $1 \dots n$ компоновки СОЖ.

Показатели S , P_{res} , Q_{gim} , Q_{wim} , R с соответствующими индексами характеризуют работу скважины в моменты времени t , отмечены на графиках, представленных сплошными линиями на рис. 3.

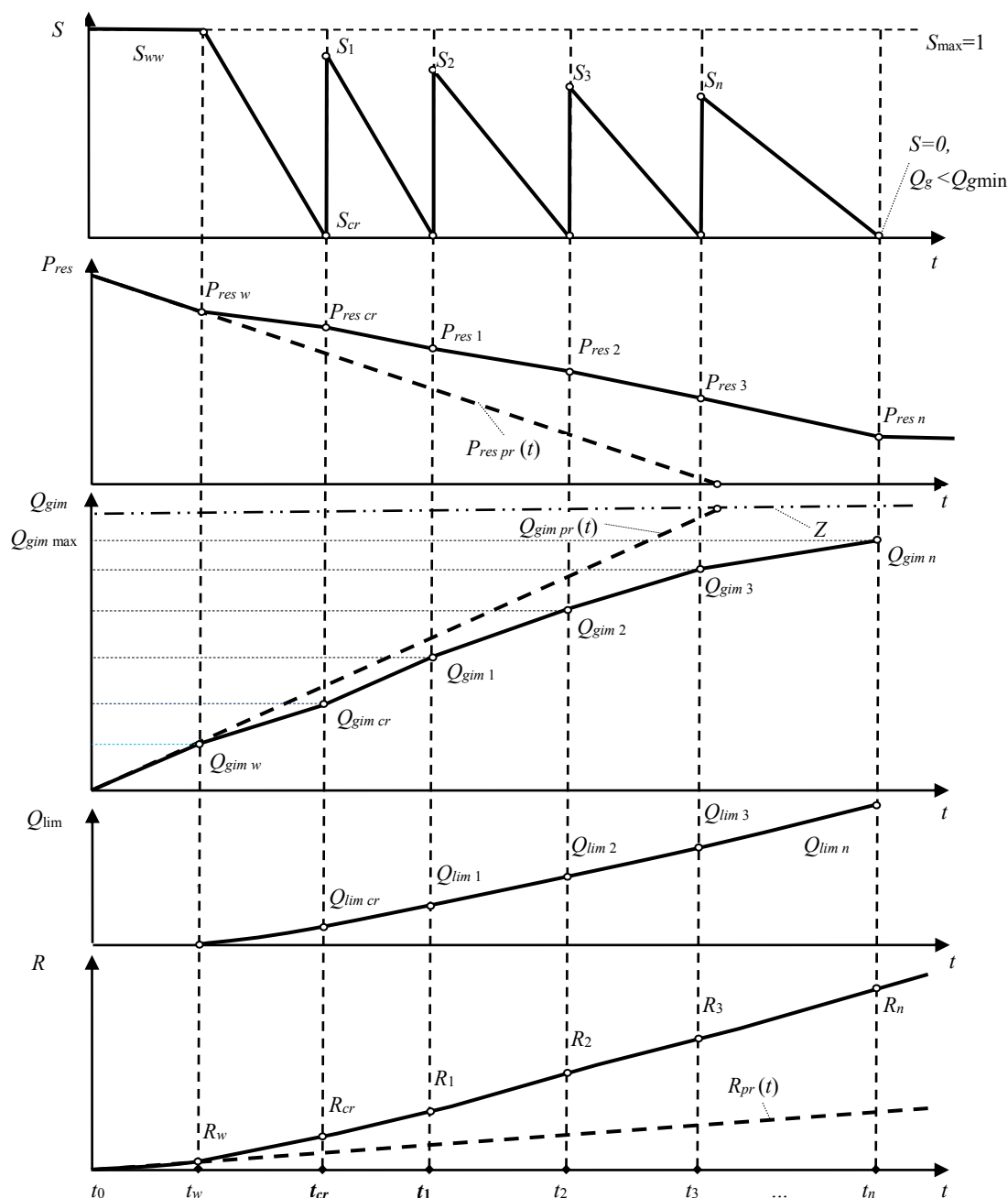


Рис. 3. Показатели работы газовой скважины в условиях обводнения

Графики показателей (см. жирные пунктирные линии на рис. 3) $P_{res pr}(t)$, $Q_{gim pr}(t)$, $R_{pr}(t)$ характеризуют работу «сухой» скважины – проектные значения показателей.

Для характеристики работы скважины в условиях обводнения необходимо уточнить определения некоторых понятий.

Величина неблагоприятного воздействия обводнения (Q_w) – дебит пластовой воды, который поступает на забой скважины $Q_w = Q_{wim} / Y_d$.

Время работы скважины t_{ot} – время фактической работы скважины за определенный промежуток времени. Включает время вывода скважины на стационарный режим работы и время стационарного режима работы скважины.

Календарное время t_{ct} – максимально возможное время работы скважины за определенный промежуток времени.

Время простоя скважины t_{rt} – время, когда скважина не работает, включает время проведения

ремонтных работ, время исследований, время остановки скважины при периодической эксплуатации.

Коэффициент эксплуатации скважины (K_o) – отношение времени работы скважины t_{ot} к календарному времени t_{ct} : $K_o = t_{ot} / t_{ct}$.

Период промышленной эксплуатации скважины – это период эксплуатации скважины, во время которого обеспечивается поддержание промышленного дебита газа.

Работоспособность скважины – свойство, определяющее способность скважины поддерживать дебит газа выше минимального рентабельного дебита газа.

Восстанавливаемость скважины – свойство, определяющее возможность вернуть работоспособность при использовании СОЖ.

Жизнеспособность скважины – свойство, определяющее способность поддерживать промышленный дебит газа, $S > 0$.

Нежизнеспособность скважины – свойство, противоположное жизнеспособности, т.е. неспособность поддерживать промышленный дебит газа, $S = 0$.

Потери газа $O_{gim\ loss}$ – разница между проектной и расчетной накопленной за весь период эксплуатации добычей газа: $O_{gim\ loss} = O_{gim\ pr} - O_{gim}$.

Запас живучести – отношение расчетной живучести скважины к проектной в определенный момент времени.

Средний запас живучести – среднее значение запаса живучести системы добычи газа за определенный период времени.

Удельная добыча газа (U_g) – отношение накопленной добычи газа за определенный период времени O_{gim} к ресурсозатратам на ее эксплуатацию R : $U_g = O_{gim} / R$.

Критерий выбора средства обеспечения живучести системы добычи газа

Подбор СОЖ системы добычи газа производят с учетом следующих данных:

- производственных параметров скважины (истории добычи, конструкции скважины, глубины забоя, пластового давления и температуры, траектории ствола скважины, состава и свойств пластового флюида, содержание механических примесей);

- инфраструктурных параметров скважины (местоположение, ограниченность пространства, тип закачивания, источник внешней энергии, герметичность эксплуатационной колонны);

- возможных производственных проблем (коррозия оборудования, пенообразование, солеотложение, гидратообразование).

Для выбора наилучшего СОЖ системы добычи газа авторами [1] предлагается критерий, математическое выражение которого представляется целевой функцией

$$S \left\{ Y_p(E(t)), Y_r(V_l, E(t)), Y_d(E(t)) \right\} \xrightarrow[Q_g > Q_{g\ min}]{} \max, U(E(t))$$

где $U(E(t))$ – управляющее воздействие с учетом применяемого СОЖ E во времени t .

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований определены показатели, характеризующие работу объектов добычи газа в условиях обводнения.

Предложена модель живучести объектов добычи газа, включающая модель «пласт–скважина», модель обводнения, модель средств обеспечения живучести. Определены основные ресурсы, необходимые для эксплуатации системы добычи газа с использованием средств обеспечения живучести и ее исследования. Разработан математический аппарат для расчета коэффициента живучести объекта добычи газа, учитывающий такие свойства, как результативность и ресурсоемкость в условиях применения технологий борьбы с обводнением. Выявлены параметры, которые необходимо учитывать при выборе средств обеспечения живучести. Определен критерий выбора наилучшего средства обеспечения живучести обводненной газовой скважины. Разработанный методический аппарат позволит проводить подбор средств обеспечения живучести и является основой для построения автоматизированной системы научных исследований живучести обводненных газовых скважин.

Литература

1. Соловьев Н.А. Концепция автоматизации научных исследований живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин / Н.А. Соловьев, А.Ф. Валеев // Программные продукты и системы. – 2019. – Т. 32, № 3. – С. 462–471. – DOI: 10.15827/0236-235X.127.462-471.
2. Общеотраслевые руководящие методические материалы по созданию автоматизированных систем научных исследований и комплексных испытаний образцов новой техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20070928082241/http://linux.nist.fss.ru/hr/doc/gtk/asni.htm>, свободный (дата обращения: 18.11.2021).
3. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200136419>, свободный (дата обращения: 18.11.2021).
4. Волик Б.Г. Эффективность, надежность и живучесть управляющих систем / Б.Г. Волик, И.А. Рябинин // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 12. – С. 151–160.
5. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. – М.: Знание, 1987. – 32 с.
6. Черкесов Г.Н. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многократных воздействиях высокой точности. – Ч. 1 / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин // Надежность. – 2016. – № 2. – С. 3–15.
7. Черкесов Г.Н. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многократных воздействиях высокой точности. – Ч. 2 / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин // Надежность. – 2016. – № 3. – С. 26–34. – DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-26-34.
8. Недосекин А.О. Методы и модели оценки функциональной живучести структурно-сложных технических систем / А.О. Недосекин, В.В. Виноградов, З.И. Абдулаева. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2018. – 127 с.
9. Надежность технических систем: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Болдырев, В.В. Болотин, И.А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

10. ResiliNets [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://resilinet.org>, свободный (дата обращения: 18.11.2021).

11. Ellison R. Survivability assurance for systems of systems. Technical report. – Networked System Survivability, 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://www.researchgate.net/publication/235112267_Survivability_Assurance_for_System_of_Systems, свободный (дата обращения: 18.11.2021).

12. Omer M. The resilience in network infrastructure systems. – Singapore: World Scientific, 2013. – 236 p.

13. Deffaunt G., Gilbert N. Viability and resilience of complex systems. – Germany: Springer, 2011. – 236 p.

14. Стекольников Ю.И. Живучесть систем. – СПб.: Политехника, 2002. – 156 с.

15. Черных В.А. Математическая теория живучести систем добычи газа / В.А. Черных, В.В. Черных. – М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2015. – 219 с.

16. Петухов Г.Б. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем / Г.Б. Петухов, В.И. Якунин. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.

17. Баишев В.З. Автоматизированная информационная система ведения геолого-промысловых данных нефтегазоконденсатных месторождений / В.З. Баишев, И.С. Вологин, А.Ф. Валеев // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2016. – № 3. – С. 25–29.

18. Валеев А.Ф. Моделирование системы «пласт-скважина–шлейф» обводненных газовых скважин / А.Ф. Валеев, А.Г. Шуэр, Н.А. Соловьев // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2012. – № 10. – С. 31–35.

Соловьев Николай Алексеевич

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем

Оренбургского государственного университета

Победы пр-т, д. 13, г. Оренбург, Россия, 460018

Тел.: +7 (353-2) 37-25-54

Эл. почта: povtas@mail.osu.ru

Валеев Артем Фаатович

Канд. техн. наук, нач. отд. геолого-гидродинамического

моделирования Службы разработки месторождений и

геологоразведочных работ Инженерно-технического

центра ООО «Газпром добыча Оренбург»

Чкалова ул., д. 1/2, г. Оренбург, 460058

ORCID: 0000-0001-8367-2547

Тел.: +7 (353-2) 73-10-37

Эл. почта: a.valeev@gdo.gazprom.ru

Solovyov N.A., Valeev A.F.

Development of gas production system survivability model in the conditions of well flooding

The article is devoted to the development of methodological support for an automated system that allows carrying scientific research on the survivability of flooded gas wells. A model of the gas production system survivability under conditions of well flooding is proposed. It includes a «reservoir-well» model, a model of adverse effects of flooding, a model of physical processes, a model of primary flooding consequences, a model of means of ensuring survivability, a model of the primary flooding consequences development, a calculation unit indica-

tors of survivability and a database for working with initial data and simulation results. Based on the analysis of existing approaches to assessing the survivability of technical systems, the coefficient of gas production system survivability under flooding conditions has been developed. It depends on the properties of performance, resource intensity when using technologies to combat flooding in wells. A criterion for choosing the best means of ensuring the survivability of a flooded gas well is proposed, taking into account the parameters of the reservoir, well design and equipment, and gas flow rate.

Keywords: automation, scientific research, gas well, flooding, survivability, efficiency, resource intensity, modeling.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-93-100

References

1. Soloviev N.A., Valeev A.F. The automation of scientific studies on the concept of gas well survivability during water flooding. *Software & Systems*, 2019, no. 3, pp. 462–471. doi: 10.15827/0236-235X.127.462–471 (in Russ.).

2. *Obshcheotraslevyye rukovodyashchiye metodicheskiye materialy po sozdaniyu avtomatizirovannykh sistem nauchnykh issledovaniy i kompleksnykh ispytaniy obraztsov novoy tekhniki* [Industry-wide guiding methodological materials for the creation of automated systems for scientific research and integrated testing of new technology samples]. Available at: <https://web.archive.org/web/20070928082241/http://linux.nist.fss.ru/hr/doc/gtk/asni.htm>, free. (Accessed: November 18, 2021) (in Russ.).

3. GOST 27.002–2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200136419>, free (Accessed: November 18, 2021) (in Russ.).

4. Volik B.G., Ryabinin I.A. *Effektivnost', nadezhnost' i zhivuchest' upravlyayushchih sistem* [Efficiency, reliability and survivability of control systems]. *Automation and telemechanics*, 1984, no. 12, pp. 151–160 (in Russ.).

5. Cherkesov G.N. *Metody i modeli otsenki zhivuchesti slozhnykh sistem* [Methods and models for assessing the survivability of complex systems]. Moscow, Znaniye Publ., 1987, 32 p. (in Russ.).

6. Cherkesov G.N., Nedosekin A.O. Description of approach to estimating survivability of complex structures under repeated impacts of high accuracy. *Reliability*, 2016, no. 2, part 1, pp. 3–15 (in Russ.).

7. Cherkesov G.N., Nedosekin A.O. Description of approach to estimating survivability of complex structures under repeated impacts of high accuracy. *Reliability*, 2016, no. 3, part 2, pp. 26–34 (in Russ.). doi: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-26-34.

8. Nedosekin A.O., Vinogradov V.V., Abdulaeva Z.I. *Metody i modeli ocenki funktsional'noj zhivuchesti strukturno-slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Methods and models for assessing the functional survivability of structurally complex technical systems]. St.-Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University Publ., 2018. 127 p. (in Russ.).

9. Belyaev Yu.K., Boldyrev V.A., Bolotin V.V., Ushakov I.A. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: spravochnik* [Reliability of technical systems: handbook]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1985, 608 p. (in Russ.).

10. ResiliNets. Available at: <https://resilinet.org>, free (Accessed: November 18, 2021).

11. Ellison R. Survivability assurance for systems of systems. Technical report. Networked System Survivability, 2008. Available at: https://www.researchgate.net/publication/235112267_Survivability_Assurance_for_System_of_Systems, free (Accessed: November 18, 2021).

12. Omer M. *The resilience in network infrastructure systems*. Singapore, World Scientific Publ., 2013, 236 p.

13. Deffaunt G., Gilbert N. *Viability and resilience of complex systems*. Germany, Springer Publ., 2011, 236 p.

14. Stekolnikov Yu.I. *Zhivuchest' sistem* [Survivability of systems]. St. Petersburg, Politechnika Publ., 2002, 156 p. (in Russ.).

15. Chernykh V.A., Chernykh V.V. *Matematicheskaya teoriya zhivuchesti sistem dobychi gaza* [Mathematical theory of survivability of gas production systems]. Moscow, Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences Publ., 2015, 219 p. (in Russ.).

16. Petukhov G.B., Yakunin V.I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya celenapravlennykh processov i celeustremlennykh sistem* [Methodological foundations of external design of purposeful processes and purposeful systems]. Moscow, AST Publ., 2006, 504 p. (in Russ.).

17. Baishev V.Z., Vologin I.S., Valeev A.F. Automated information support system for oil and gas fields geological and field data. *OIL AND GAS TERRITORY*, 2016, no. 3, pp. 25–29 (in Russ.).

18. Valeev A.F., Shuer A.G., Solovyov N.A. Simulation of the system «reservoir-well-pipeline» in watercut gas wells. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2012, no. 10, pp. 31–35 (in Russ.).

Nikolay A. Solovyov

Doctor of Science in Engineering, Professor, Supervisor of Software Department, Orenburg State University
13, Pobedy pr., Orenburg, Russia, 460018
Phone: +7 (353-2) 37-25-54
Email: povtas@mail.osu.ru

Artem F. Valeev

Candidate of Science in Engineering, Head of Geological and Hydrodynamic Simulation Department, Field Development and Exploration Services in the Engineering Center, Gazprom Dobycha Orenburg
1/2, Chkalova st., Orenburg, Russia, 460058
Phone: +7 (353-2) 73-10-37
Email: a.valeev@gdo.gazprom.ru

УДК 528.8.04

М.Ю. Катаев, А.К. Лукьянов, П.Н. Ткаченко

Методика определения времени вскрытия и замерзания реки по защищенным многоспектральным спутниковым данным и измерениям прибором MODIS

Наблюдение за поверхностными водами имеет важное значение для экологических и гидрологических исследований, а также для практического применения в МЧС. В данной статье рассматривается вопрос обнаружения и мониторинга поверхностных вод с помощью оптического дистанционного зондирования многоспектральным спутниковым прибором MODIS, кратко обсуждаются текущее состояние и проблемы в этой области. Обнаружение воды проводится на основе анализа значений вегетационных индексов NDVI, рассчитанных по измерениям в течение года, исходя из четкого разделения по величине значений индексов для растений, снега или воды. На основе этого анализа строится пространственно-временная маска водных объектов или маска, пиксели которой используются для определения времени вскрытия и замерзания реки. Для этого рассматриваются графики пространственно-временной динамики пикселей водной маски и строятся сглаженные значения. Следующий шаг связан с поиском в этих зависимостях времени вскрытия реки от зимнего льда и замерзания реки. В данной статье приводится описание обработки реальных измерений для территории междуречья Обь–Томь в районе г. Томска.

Ключевые слова: спутниковые измерения, водные объекты, водные индексы, водная маска, время.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-101-106

Поверхностные водные объекты (речные, водно-болотные, озерные и т.д.) относятся, в большей мере, к пресным водоемам, расположенным на поверхности Земли. К ним нельзя относить океаны, потому что они являются солеными и к тому же занимают почти 70% поверхности Земли [1]. Поверхностные водные объекты критически важны для человека, так как являются носителями пресной воды, необходимой для поддержания всех форм жизни. Кроме этого, водные объекты представляют собой важные компоненты гидрологического цикла, затрагивающие различные виды производства в сельском хозяйстве, электроэнергетики, транспорте, промышленности и т.д. Вариации состава и качества водных объектов воздействуют на природные ресурсы и человека, а также определяют состояние окружающей среды. Изменение объема поверхностных водных объектов обычно вызывает серьезные последствия в виде засухи или затоплений и поэтому крайне важно эффективно обнаруживать наличие водных объектов, количественно оценивать их объем и отслеживать динамику.

Технология дистанционного зондирования предлагает эффективные способы [2] наблюдения за поверхностью Земли, в том числе за поверхностными водными объектами. По сравнению с традиционным локальным способом измерения (отслеживание с помощью удаленных друг от друга датчиков уровня) дистанционное зондирование намного эффективнее ввиду способности регулярно проводить мониторинг поверхности Земли в различных участках электромагнитного спектра на больших территориях. Наборы данных дистанционного зондирования обеспечивают возможность анализа пространственно-временных наблюдений [3] ряда физических характеристик земной поверхности. Одной из таких характеристик является вегетационный индекс, ко-

торый может быть соответствующим образом использован для выделения водных объектов, картографирования и мониторинга их динамики.

Целью данной работы является разработка методики обработки многоспектральных изображений спутникового радиометра MODIS, определения территории, занимаемой реками, и построения водных масок для разных сезонов года. На основе полученной информации необходимо изучить время перехода воды от состояния льда в жидкое состояние и наоборот для территории р. Томь в районе г. Томска.

Спутниковые многоспектральные приборы

С момента появления первого спутника для изучения типов поверхности Земли (Landsat-1) в 1972 г. [4] спутниковые оптические датчики продемонстрировали свой потенциал для мониторинга типов и изменений земной поверхности. Динамика поверхностных вод является важным явлением изменения земного покрова [5]. Пространственное разрешение спутниковых приборов определяет уровень детализации поверхностных объектов, которые фиксируются на измеренных изображениях. Выделяют три группы приборов: низкое разрешение (> 250 м), среднее (5–250 м) и высокое (< 5 м).

Спутниковые приборы, обеспечивающие низкое пространственное разрешение, имеют недостаток слабой детализации объектов поверхности Земли, однако имеют хорошую информативность за счет высокого временного разрешения и широкого охвата территории. Примером является радиометр NOAA/AVHRR [6], разработанный для контроля океана и атмосферы, имеющий пространственное разрешение пикселя 1,1 км, полосу обзора 2500 км и получающий изображение всей поверхности Земли за один день. Результаты измерений этого спутникового прибора используют для обнаружения масштабных наводнений.

Самыми популярными спутниковыми приборами являются радиометры MODIS [7], которые имеют название Terra и Aqua и широко применяются во многих областях науки и практики для исследования сельскохозяйственной земли, изменения растительного покрова, водных объектов и мониторинга атмосферы. Данные измерений представляют собой 36 мультиспектральных полос с пространственным разрешением 250 м (видимая область), 500 м (ближняя инфракрасная) и 1000 м (ИК-область спектра). Другой прибор Suomi NPP-VIIRS [8] имеет ширину полосы обзора 3000 км, 22 спектральных канала в видимой и ИК-областях спектра, два пространственных разрешения: 375 и 750 м. Применение данных этого спутникового прибора аналогично радиометру MODIS [9]. Несмотря на то, что между двумя последними приборами есть небольшая разница в пространственном разрешении, прибор MODIS выглядит более предпочтительным для изучения динамики водных объектов, так как имеет время возвращения в ту же географическую точку 6 ч (учитывая два однотипных прибора), а NPP-VIIRS – 12 ч.

Существуют спутниковые спектральные инструменты среднего пространственного разрешения (10, 30 м) Landsat [10] и Sentinel [11], однако между их возвращением в ту же географическую точку проходит несколько дней (10, 16), что ограничивает их применение для целей исследования динамики водных объектов.

Постановка задачи

В настоящее время базовым и часто используемым видом изучения космических синтезированных изображений («естественные цвета») является визуальное дешифрирование. Для автоматизации процесса дешифрирования в большинстве методик используются различные подходы кластеризации, основанные на цветовых и/или текстурных показателях. Эти подходы являются объективными, однако зависимыми от множества факторов прохождения излучения через атмосферу и числа типов поверхности, попадающих в площадь того или иного пикселя изображения. Проблемой для обработки таких изображений является то, что типы поверхности имеют различную спектральную природу отражения, и сказывается влияние рельефа поверхности. Это приводит к тому, что возникают погрешности при отнесении различных измерений к одному и тому же классу типов поверхности. Вклад, связанный с влиянием состояния атмосферы на измерения, корректируется на этапе предварительной обработки [12].

Определение водных объектов осложняется рядом факторов, зависящих от времени измерений (времени суток и сезона года), что затрудняет создание стандартных автоматизированных алгоритмов. Также необходимо учитывать множество возможных изменений спектральных свойств водных объектов, их глубину и качество (мутность и наличие хлорофилла). Принципиальными для учета факторами являются: слабое изменение пространственных ха-

рактеристик пикселей изображения, связанных с рекой, с одной стороны, и их изменчивость, обусловленная температурой (утро–день–вечер), с другой стороны.

Алгоритм поиска пикселей, связанных с рекой, на основе измеренного многоспектрального изображения позволяет находить их по значениям отражательной способности водных объектов. Вода характеризуется низкими значениями спектральных коэффициентов отражения относительно других природных объектов [13], которые, даже в состоянии увлажнения, имеют больший коэффициент отражения. Эту зависимость используют для выделения водных объектов на измеренном изображении. Однако в некоторые моменты времени в воде возникают большие по площади ареалы водных растений, которые естественно имеют спектр отражения, отличный от воды, что приводит к ошибкам классификации типа поверхности.

Одной из важнейших для научных и практических целей задач является определение времени нахождения водного объекта в состоянии наличия или отсутствия льда на его поверхности. Важно детектировать не только время наступления того или иного состояния водного объекта, но и его длительность. Решение этой сложной задачи требует регулярных (ежедневных) измерений, которые в настоящее время осуществляет только прибор MODIS. Заметим, что мешающим фактором для решения задачи выделения водных объектов является облачность, которая может быть разрывной, сплошной или полупрозрачной [14].

Методика выделения водных объектов на основе вегетационного индекса

Принцип выделения поверхностных водных объектов из оптических спутниковых изображений заключается в учете информации о заведомо более низком спектральном коэффициенте отражения воды по сравнению с другими типами земной поверхности. Исходя из этого, были разработаны многочисленные методы для выделения водных объектов из изображений оптического диапазона спектра средствами дистанционного зондирования. Одним из простых подходов является применение инфракрасного диапазона для получения карты водных объектов [15]. Однако проблема с методами, работающими в ИК-области спектра, заключается в том, что применяемые правила классификации не позволяют построить точный и надежный алгоритм, так как очень сложно в этом диапазоне спектра отличить мокрую после дождя поверхность от водной поверхности. Простым и эффективным способом извлечения воды является использование спектральных коэффициентов отражения воды в двух или более спутниковых каналах видимой области спектра, что позволяет выявить различия между водными и неводными территориями. На основе такого подхода разработано множество индексов, позволяющих выделять площади поверхностных водных объектов или степени паводкового затопления [16, 17]. Одна-

ко в этом случае в летнее время сказывается наличие в воде растений, которые не позволяют с высокой точностью выделить водный объект.

Известен индекс влажности (TCW), полученный из шести спектральных спутниковых каналов, устанавливающий порог 0 или 1 для разделения водных и неводных объектов [18]. Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) является самым популярным по практическому применению при изучении типов поверхности и часто используется для обнаружения воды и наводнений в некоторых исследованиях. Известны и другие полезные индексы для выделения водных объектов, такие как нормализованный разностный водный индекс NDWI, его развитие mNDWI, WRI, AWEI и др. [19].

Для выделения водных объектов нами предлагается использовать информацию о пространственно-временном изменении вегетационного индекса, который в местоположении водных объектов имеет специфическое поведение, которое исследуется в данной статье.

Для исследований нами был выбран нормализованный вегетационный индекс NDVI, позволяющий не только выделить, но и определить состояние растительности. Индекс NDVI рассчитывается на основе двух спектральных каналов: красного канала (RED) и канала из ближней инфракрасной области (NIR). Используется разная величина отражения в NIR- и RED-каналах, что позволяет контролировать плотность и интенсивность роста зеленой растительности с использованием спектрального отражения солнечной радиации. Облака и снег имеют большее спектральное отражение в видимом диапазоне, чем в ближнем инфракрасном диапазоне, в то время как разница отражательной способности для горной поверхности и почвы практически равна нулю. Поэтому облака, вода и снег показывают отрицательные значения, а другие типы поверхности – значения, близкие к нулю или больше нуля.

Для вычисления вегетационного индекса используют следующую формулу:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра.

Вычисленные по текущим значениям много-спектральных изображений спутникового спектро-радиометра MODIS значения NDVI представляют оперативную информацию об эколого-климатическом состоянии. Также эти значения позволяют отслеживать динамику различных объектов на поверхности Земли. Большой пространственный охват спутниковых изображений дает возможность проводить мониторинг территорий, соразмерных с площадями областей (полоса 2300 км).

Предлагаемая методика

Сформированный ряд значений вегетационного индекса NDVI для одного пикселя изображения, полученных в течение года, связан с проблемой, ко-

торая заключается в пиковой структуре (рис. 1). Пиковая структура связана с появлением облачного покрова во время измерений (низкое значение вегетационного индекса). Некоторые небольшие вариации значений NDVI возникают вследствие изменения температуры, влажности и освещенности солнцем. Известно, что изучение формы временного ряда NDVI позволяет классифицировать типы растительности и их изменения в зависимости от различных факторов. Решение этой задачи требует разработки единого подхода для всех временных рядов NDVI, в которых отсутствует высокая изрезанность. Сглаживание временных рядов вегетационного индекса связано с проблемой выявления ложных провалов и пиков, которые обусловлены иными, чем влияние облачности, процессами.

На рис. 1 представлен ряд значений вегетационного индекса NDVI, рассчитанных для пикселей в районе г. Томска в 2017 г., где расположены хвойные растения. Видно, что исходный временной ряд NDVI содержит множество пиков и провалов. Такие ряды наблюдений для обнаружения временных интервалов чрезвычайно сложны и требуют предварительной обработки, формально, приведению к безоблачному случаю. В статье применяется методика сглаживания временных рядов NDVI [20], которая связана с идеей фильтрации шума с помощью алгоритма скользящей медианы.

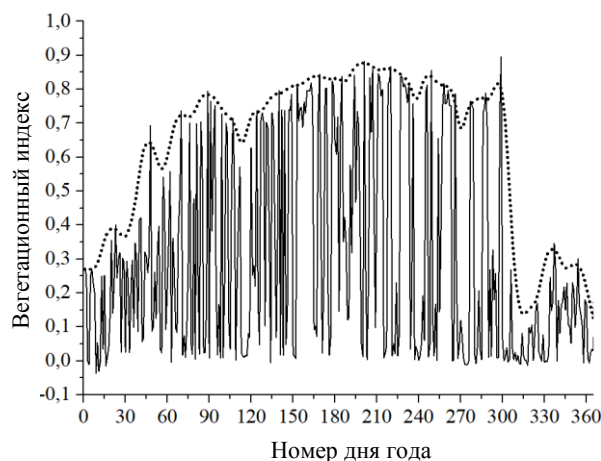


Рис. 1. Исходный (сплошная линия) и сглаженный (точки) ряд значений NDVI для хвойной растительности в 2017 г.

На рис. 2 показан результат сглаживания популярным на практике методом Савицкого–Голая ряда значений вегетационного индекса для пикселя, где расположены лиственные растения. Видно, что поведение NDVI для хвойных и лиственных растений в течение года разительно отличается, что позволяет использовать этот факт для решения задач дешифрирования.

На рис. 3 представлен временной ряд вегетационного индекса для пикселя, принадлежащего водному объекту р. Томи, хорошо отличающийся от пикселя, где наблюдается растительность (рис. 1 – хвойная и рис. 2 – лиственная). При сравнении результатов сглаживания значений вегетационного

индекса в течение года предлагаемым подходом и методом Савицкого–Голая [21] можно увидеть, что подход [20] выполняет эту процедуру более точно.

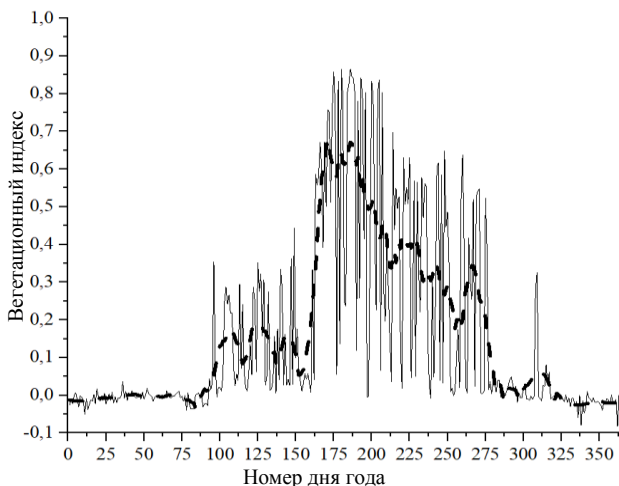


Рис. 2. Исходный ряд значений NDVI (сплошная линия) и сглаженный методом Савицкого–Голая (штриховая линия) для лиственной растительности в 2017 г.

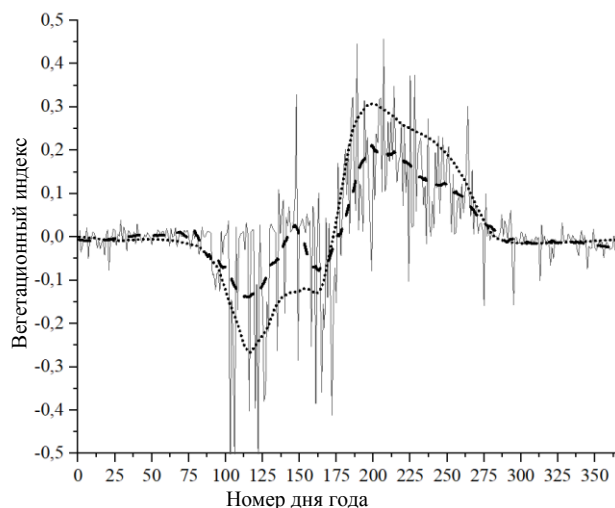


Рис. 3. Результат сглаживания значений NDVI (сплошная линия) для пикселя, попадающего в р. Томь, методом Савицкого–Голая (штриховая линия) и предлагаемым авторами подходом (точки) в 2017 г.

Анализ результатов

Состав водного объекта существенно зависит от географической широты и типа почв, через которые река протекает (камень, глина или песок). Это все определяет разнообразные физические и химические процессы, протекающие в толще воды под воздействием солнечного излучения и вариаций температуры. Для поиска времени начала ледохода (появление больших площадей воды) и замерзания воды (появление льда на реке) нами выполняется простая процедура временного анализа нормализованного вегетационного индекса. Эмпирическим путем было получено, что середина отрезка (см. рис. 3), начинающегося от нуля вегетационного индекса (80-й день) и минимума (115-й день), попадает на время ледохода (105-й день, или 15 апреля). В 2017 г. ледо-

ход прошел в городской черте именно 15 апреля, а это говорит о том, что такой подход показывает достоверное время ледохода.

Далее определяется время замерзания реки, когда вегетационный индекс останавливается на значении в районе нуля. Учитывая этот факт, замерзание воды в р. Томь начинается на 280-й день и завершается к 310 дню года. Середина отрезка определяется 295-м номером дня, или 22 октября, а реально река остановилась 24 октября. Из рис. 3 видно, что процесс замерзания более сжат во времени и составляет 30 дней, а вскрытие реки проходит примерно за 40 дней. Несмотря на некоторую неточность определения времени замерзания, подход является универсальным и позволяет строить динамику вскрытия реки по всей ее длине. Далее можно уже рассматривать влияние метеорологических параметров (температура, освещенность, влажность и т.д.) на время вскрытия и построение регрессионных моделей. Такие модели позволяют проводить прогнозные расчеты времени вскрытия и замерзания реки, что важно для народного хозяйства и МЧС.

Указанный выше подход легко переводится в автоматизированный алгоритм, который рассматривает пиксели спутникового изображения в течение года, находит связанные с водным объектом и детектирует временной интервал вскрытия и замерзания реки.

Заключение

Представлены результаты расчета времени вскрытия и замерзания водных объектов Западной Сибири на примере р. Томь в районе г. Томска. Проведен анализ спутниковых систем, данные которых можно применить для решения такой задачи. Для решения данной задачи предложен подход, связанный с использованием ежедневных данных измерений спутниковым спектрорадиометром MODIS, полученных в течение года. На основе данных измерений рассчитывается вегетационный индекс NDVI, который нормализуется с помощью процедуры сглаживания. Сглаженный ряд значений вегетационного индекса анализируется на предмет поиска временных отрезков, связанных с периодами вскрытия и замерзания реки. Рассматривая периоды времени, связанные с состоянием водных объектов, можно вычислить с достаточно хорошей точностью дни года, показывающие время вскрытия и замерзания реки. В статье рассматривается р. Томь в районе г. Томска. Так как река имеет достаточную длину и нельзя поставить датчики по всей её протяжённости, предлагаемая методика позволит с хорошей точностью прогнозировать периоды вскрытия и замерзания реки.

Литература

1. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. – СПб.: Гос. гидрологический ин-т, 2008. – 600 с.
2. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, А.В. Криштопов, А.И. Кудря. – М.: Техносфера, 2020. – 482 с.

3. Чандра А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.

4. The global Landsat archive: Status, consolidation and direction / M.A. Wulder, J.C. White, T.R. Loveland, C.E. Woodcock, A.S. Belward, W.B. Cohen, E.A. Fosnight, J. Shaw, J.G. Masek, D.P. Roy // *Remote Sens. Environ.* – 2016. – Vol. 185. – P. 271–283.

5. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 г.». – М.: НИИ-Природа, 2019. – 290 с.

6. National Centers for Environmental Information. – URL: <https://www.nci.noaa.gov> (дата обращения: 13.04.2022).

7. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). – URL: <https://ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS> (дата обращения: 13.04.2022).

8. Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). – URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 13.04.2022).

9. MODIS and VIIRS calibration and characterization in support of producing long-term high-quality data products / X. Xiong, A. Angal, T. Chang, K. Chiang, A. Wu // *Remote Sens.* – 2020. – Vol. 12. – P. 3167–3172.

10. Landsat Science. – URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 13.04.2022).

11. Sentinel Online. – URL: <https://sentinels.copernicus.eu> (дата обращения: 13.04.2022).

12. Hadjimitsis D.G. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs / D.G. Hadjimitsis, C.R.I. Clayton, V.S. Hope // *International Journal of Remote Sensing.* – 2004. – Vol. 25(18). – P. 3651–3674.

13. The ASTER spectral library version 2.0. / A.M. Baldridge, S.J. Hook, C.I. Grove, G. Rivera // *Remote Sens Environ.* – 2009. – Vol. 113. – P. 711–716.

14. Чернокульский А.В. Климатология облачности в арктических и субарктических широтах по спутниковым, наземным наблюдениям и данным реанализа // *Солнечно-земная физика.* – 2012. – Вып. 21. – С. 73–78.

15. Frazier P.S. Water body detection and delineation with Landsat TM data / P.S. Frazier, K.J. Page // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* – 2000. – Vol. 66. – P. 1461–1468.

16. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery / G.L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt, S.R. Proud // *Remote Sensing of Environment.* – 2014. – Vol. 140. – P. 23–35.

17. Катаев М.Ю. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям / М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров // *Доклады ТУСУР.* – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 105–108.

18. Carlson T.N. A method to make use of thermal infrared temperatures and NDVI measurements to infer soil water content and fractional vegetation cover / T.N. Carlson, R.R. Gillies, E.M. Perry // *Remote Sensing Reviews.* – 1994. – Vol. 9. – P. 161–173.

19. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI / W. Li, Z. Du, F. Ling, D. Zhou, H. Wang, Y. Gui, X. Zhang // *Remote Sensing.* – 2013. – Vol. 5(11). – P. 5530–5549.

20. Катаев М.Ю. Методика выравнивания временных рядов вегетационного индекса NDVI, полученных по данным спектрометра MODIS / М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров, А.К. Лукьянов // *Доклады ТУСУР.* – 2016. – № 1. – С. 35–39.

21. Savitzky A. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures / A. Savitzky, M.J.E. Golay // *Anal. Chem.* – 1964. – Vol. 36. – P. 1627–1639.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-7710-5463
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Лукьянов Андрей Кириллович

Канд. техн. наук, доцент каф. АСУ ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9290-4450
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-953-911-61-97
Эл. почта: lukyanov.ak@asu.tusur.ru

Ткаченко Павел Николаевич

Канд. техн. наук, нач. каф. оперативного управления мероприятиями Российской системы чрезвычайных ситуаций и гражданской обороны Академии гражданской защиты МЧС России Соколовская ул., стр. 1А, г. Химки, Московская обл., Россия, 141435
Тел.: +7 (498-6) 99-06-80
Эл почта: tkachenko.p.n@amchs.ru

Kataev M.Yu., Lukyanov A.K., Tkachenko P.N.

Method for determining the time of opening and freezing of the river by protected multispectral satellite data and measurements by the MODIS instrument

An observation of surface waters is of a great importance for environmental, hydrological research, as well as practical applications and for the Russian Ministry of Emergency Situations. This article deals with the issue of detection and monitoring of surface waters using optical remote sensing by the MODIS multispectral satellite instrument. The current status and problems in this area are briefly discussed. The water detection is based on an analysis of NDVI vegetation index values calculated from measurements throughout the year from a clear division by value of plant, snow or water index values. Based on this, a spatio-temporal mask of water objects or a mask is built, the pixels of which are only used to analyze the values of the vegetation index. Next, the graphs of spatio-temporal dynamics of water mask pixels and construct smoothed values are considered. The following step is related to the search in these dependencies for the moment of opening of the river from winter ice and freezing of the river. A description is given of the processing of real measurements for the territory of the Ob-Tom interfluvium, in the region of the city of Tomsk.

Keywords: satellite measurements, water bodies, water indices, water mask, time.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-101-106

References

1. *Vodnye resursy Rossii i ih ispolzovanie* [Water resources of Russia and their use]. Ed. I.A. Shiklomanova, St. Petersburg: State Hydrological Institute., 2008, 600 p. (in Russ.).

2. Gruzlov V.V., Kolkovsky Yu.V., Krishtopov A.V., Kudrya A.I. *Novye tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [New technologies for remote sensing of the Earth from space]. Moscow, Technosfera, 2020, 482 p. (in Russ.).

3. Chandra A.M., Gosh S.K. *Distantionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy* [Remote sensing and geographic information systems]. Moscow, Technosfera, 2008, 312 p. (in Russ.).
4. Wulder M.A., White J.C., Loveland T.R., Woodcock C.E., Belward A.S., Cohen W.B., Fosnight E.A., Shaw J., Masek J.G., Roy D.P. The global Landsat archive: Status, consolidation and direction. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 185, no. 4, pp. 271–283.
5. *Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii i ispolzovanii vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu»* [State report «On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2018»]. Moscow, NIA-Priroda, 2019, 290 p. (in Russ.).
6. National Centers for Environmental Information. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov> (Accessed: April 12, 2022).
7. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Available at: <https://ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS> (Accessed: April 12, 2022).
8. Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). Available at: <https://modis.gsfc.nasa.gov> (Accessed: April 12, 2022).
9. Xiong X., Angal A., Chang T., Chiang K., Wu A. MODIS and VIIRS calibration and characterization in support of producing long-term high-quality data products. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, pp. 3167–3172.
10. Landsat Science. Available at: <https://landsat.gsfc.nasa.gov> (Accessed: April 12, 2022).
11. Sentinel Online. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu> (Accessed: April 12, 2022).
12. Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, vol. 25(18), pp. 3651–3674.
13. Baldrige A.M., Hook S.J., Grove C.I., Rivera G. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, pp. 711–716.
14. Chernokulsky A.V. [Climatology of cloudiness in the arctic and subarctic latitudes according to satellite, ground-based observations and reanalysis data]. *Solar-terrestrial Physics*, 2012, vol. 21, pp. 73–78 (in Russ.).
15. Frazier P.S., Page K.J. Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, vol. 66, pp. 1461–1468.
16. Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2014, vol. 140, pp. 23–35.
17. Kataev M. Yu., Bekerov A. A. [Methods for detecting water objects by multispectral satellite measurements]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 105–108 (in Russ.).
18. Carlson T.N., Gillies R.R. A method to make use of thermal infra-red temperatures and NDVI measurements to infer soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 1994, vol. 9, pp. 161–173.
19. Li W., Du Z., Ling F., Zhou D., Wang H., Gui Y., Zhang X. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, 2013, vol. 5(11), pp. 5530–5549.
20. Kataev M.Yu., Bekerov A.A., Lukyanov A.K. [Method for alignment of time series of vegetation index NDVI obtained from MODIS spectroradiometer data]. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, no. 1, pp. 35–39 (in Russ.).
21. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 1964, vol. 36, pp. 1627–1639.

Mikhail Yu. Kataev

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Automated Control Systems, Tomsk State
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-7710-5463
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru

Andrey K. Lukyanov

Doctor of Science in Engineering, Assistant Professor,
Department of Automated Control Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID (ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9290-4450>)
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-953-911-61-97
Email: lukyanov.ak@asu.tusur.ru

Pavel N. Tkachenko

Doctor of Science in Engineering,
Head of Department of Operational Management,
Civil Defense Academy of the Ministry
of Emergency Situations of Russia
1A, Sokolovskaya st., Khimki, Moscow Oblast, 141435
Phone: +7 (498-6) 99-06-80
Email: tkachenko.p.n@amchs.ru

УДК 338.49/65.012.122

А.Н. Алимханова, А.А. Мицель

Многопродуктовая модель оценки эффективности безопасной деятельности предприятий

Понятие эффективности имеет важное значение в экономической науке, а на сегодняшний день наблюдается её возрастающая роль в каждом секторе экономики. Оценка эффективности предприятия дает возможность осуществить верную и выгодную стратегию распределения ресурсов, что показывает потенциальный уровень оценки. Существуют различные методы и модели оценки эффективности деятельности предприятий. В данной работе выполнена оценка эффективности деятельности предприятий методом Stochastic Frontier Analysis. Результаты работы показали, как изменится эффективность разных предприятий одной отрасли за несколько лет. Показано, что такая модель может быть использована для оценки финансовой устойчивости и прогнозирования банкротства.

Ключевые слова: многофакторная модель, эффективность, стохастический метод, банкротство, финансовая устойчивость, панельные данные.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-107-113

В конкурентных и динамичных рыночных условиях каждый бизнес сталкивается с высоким и низким уровнем риска. Ни один предприниматель не гарантирует, что его деятельность будет продолжаться всегда, то, что его товары или услуги будут востребованы. Довольно часто управляющие лица предприятий для достижения высокой прибыли предпринимают более рискованные действия. Другие управляющие, которые не желают рисковать и мирятся с текущей ситуацией, как правило, остаются на плаву и вынуждены покинуть рынок после того, как не выдержали конкуренцию. В связи с этим количество финансово не стабильных предприятий постоянно увеличивается. Согласно данным из Единого федерального реестра сведений о банкротстве, в 2020 г. поступило порядка 9930 сообщений о признании должника банкротом, а в 2021 г. – 10319 сообщений [1].

Предлагается подход к оценке риска потери финансовой устойчивости российских машиностроительных предприятий с использованием показателя эффективности, основанного на построении стохастической границы.

Краткий обзор литературы

Постоянно разрабатываются новые модели и методики для прогнозирования банкротства предприятий, что говорит об актуальности разработки новых подходов для оценки вероятности наступления несостоятельности предприятия.

Широкое распространение получили модели [2, 3], в которых применяется многомерный дискриминантный анализ (МДА). Эти исследования показали, что у предприятий-банкротов коэффициенты значительно отличаются от «здоровых» предприятий. В таких моделях минусом является то, что отсутствует весовой коэффициент для индикаторов, а также отсутствует итоговой коэффициент вероятности банкротства. В работе [4] используется коэффициентный метод, суть которого заключается в проведении финансового анализа предприятия. Основным недостатком метода коэффициентов является неодно-

значная интерпретация результатов, которая приводит к снижению точности диагностики банкротства, а также неучет отраслевой принадлежности.

Зарубежные модели далеко не всегда применимы в условиях российского рынка ввиду специфики организации и функционирования ряда отраслей экономики. Для успешного использования этих моделей необходима корректировка весовых коэффициентов.

Известен параметрический метод стохастического граничного анализа Stochastic Frontier Analysis (SFA) [5]. Он основан на стохастической модели производственной функции, связывающей объём выпускаемой продукции с объёмами потребляемых ресурсов. Используется несколько входных (объёмы потребляемых ресурсов) и только один выходной параметр – объём выпускаемой продукции. Предполагается, что вариация продуктивности связана как с неэффективностью деятельности, так и с «шумом», поэтому граница эффективности «погружена» в область реализации фактических результатов деятельности. При этом неэффективность распределена несимметрично, а случайная ошибка подчиняется симметричному распределению [6, 7].

Среди российских и зарубежных работ, использующих метод SFA и посвященных отдельным отраслям экономики, следует выделить работы [8–16]. Анализ, проведенный в работе [8], подтверждает применимость метода SFA для оценки эффективности товариществ собственников жилья. Авторами была выполнена модификация метода, которая заключается в том, что стандартные отклонения полунормального распределения фактора неэффективности считались зависящими от экзогенных факторов, т.е. авторы [8] предположили гетероскедастичность факторов неэффективности. Наиболее известные модели в области SFA-моделирования описаны в работе [9]. Проведено сравнение результатов оценки девяти SFA-моделей на едином массиве данных по российской бетонной и цементной промышленности. Результаты работы [9] показали, что среди вы-

бренных моделей можно выделить адекватные модели, такие как модель с четырьмя ошибками, TRUE, FE-модель и TVD-модель, так как данные модели учитывают тренд и гетерогенность. В работе [10] рассматриваются четыре модели производственного потенциала предприятий по производству и сбыту товаров хозяйственного назначения:

1) модель «logy, logL, logk, μ » может быть использована в условиях отсутствия информации о факторах неэффективности;

2) модель «logy, logL, logk, δZ » позволяет идентифицировать факторы неэффективности;

3) модель «logy, logL, logk, s» показывает, что чем больше управляемых факторов, тем меньше неустраняемая неэффективность и тем выше производственный потенциал;

4) модель «logy, logL, logk, C» учитывает общее для всех наблюдений ограничение на затраты управления факторами неэффективности.

Оценки неэффективности первых двух моделей являются завышенными. Представленный в работе [11] анализ на основе двухступенчатой методики посвящен исследованию влияния технической эффективности (ТЭ) промышленных организаций на риски их финансовой устойчивости. Полученные результаты позволяют говорить о том, что ТЭ оказывает значимое отрицательное влияние на вероятность банкротства крупных, средних и большинства малых российских промышленных предприятий.

В работе [12] представлены результаты исследования и применения экономических методов DEA и SFA для измерения эффективности финансовых субсидий для фермерских хозяйств. Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии финансовых субсидий, а также о влиянии несвязных платежей на исследуемые фермы. Разработаны две динамические сетевые модели DEA и SFA для оценки взаимосвязи между бухгалтерскими и финансовыми показателями между бухгалтерскими и финансовыми показателями банковского сектора [13]. Модели позволяют не только помочь принять решения, но и наметить направления для будущих исследований.

В работе [14] приведено обоснование целесообразности применения методов DEA и SFA для оценки экологической эффективности городского воздуха в Германии. Полученные результаты подчеркивают негативное влияние загрязнителей городского воздуха на экологическую эффективность и положительное влияние осадков на эффективность.

Авторы [15] рассмотрели как экономические, так и экологические результаты лесной промышленности. Результаты показали, что между экономическими регионами Китая, за исключением Северо-Восточного Китая, нет явных различий в эффективности. Кроме того, государственная структура лесного хозяйства оказывает значительное негативное влияние на эффективность производства в лесной промышленности Китая.

В работе [16] оцениваются вариации модели неэффективности транслога, позволяющие одно-

этапно учитывать факторы, влияющие на неэффективность тепловой энергетики Индии.

Современные методы прогнозирования банкротства предприятий основываются на применении статистического метода либо на эмпирической подборке финансовых коэффициентов. При этом предполагается, что совмещение данных подходов позволит увеличить эффективность оценки деятельности предприятий.

В данной работе представлено использование метода SFA для оценки финансовой устойчивости предприятия на основе панельных данных бухгалтерской отчетности. Предложена модификация однофакторной модели SFA в многопродуктовую.

Материалы и методы исследования

Пусть выходной показатель i -го экономического объекта характеризуется p величинами y_i^k , $k = 1, \dots, p$. Тогда связь выходного k -го показателя i -го объекта y_i^k с входными финансовыми показателями x_{ij} может быть представлена выражением

$$\ln(y_i^k) = \sum_{j=1}^m \beta_j^k \ln(x_{ij}), \quad (1)$$

где m – количество предикторов (показателей хозяйственно-финансовой деятельности объекта) регрессионной модели; β_j^k – коэффициенты регрессионной модели.

Отклонение модельных от реальных данных представляет собой ошибку ε_i^k модели

$$\varepsilon_i^k = \ln(y_i^k) - \left(\sum_{j=1}^m \beta_j^k \ln(x_{ij}) \right), k = 1, \dots, p. \quad (2)$$

Представим случайную ошибку в виде

$$\varepsilon_i^k = v_i^k - u_i^k, \quad (3)$$

где v_i^k – случайная ошибка, связанная с внешними причинами, не зависящими от деятельности экономического объекта; u_i^k – случайный фактор, связанный с деятельностью предприятия, который получил название в литературе [17, 18] неэффективность деятельности.

Предположим, что случайный фактор u_i^k i -го экономического объекта, связанный с эффективностью его работы, не зависит от номера выходного показателя, т.е. $u_i^k = u_i$. Для построения модели необходимо задать вероятностные распределения случайных величин v_i^k и u_i . Таким образом, получим многофакторную модель SFA.

Пусть распределения вероятностей случайных величин v_i^k и u_i имеют вид

$$f_v(v_i^k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \cdot \exp\left(-\frac{(v_i^k)^2}{2\sigma_v^2}\right),$$

$$f_u(u_i) = \lambda \cdot e^{-\lambda u_i}, u_i \geq 0. \quad (4)$$

Здесь индекс i – это номер экономического объекта $i = 1, \dots, n$ (n – количество рассматриваемых экономических объектов); v_i^k – случайная ошибка с параметрами $M(v_i^k) = 0$, $M(v_i^k) = \sigma_v^2$ учитывает влияние внешних факторов на деятельность экономиче-

ского объекта; u_i – неотрицательная случайная ошибка с параметрами $M(u_i) = 1/\lambda$.

Величина u_i учитывает «неэффективность» работы i -го экономического объекта, а величина $\varepsilon_i^k = v_i^k - u_i$ описывает отклонение от границы производственных возможностей.

Совместная плотность вероятности случайной величины ε_i^k и u_i равна

$$f(\varepsilon_i^k, u_i) = \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi\sigma_v}} \times \exp\left(\varepsilon_i^k \lambda + \frac{\lambda^2 \sigma_v^2}{2}\right) \times \exp\left(-\frac{(u_i + (\varepsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2))^2}{2\sigma_v^2}\right). \quad (5)$$

Тогда совместная плотность вероятностей векторной величины ε_i и u_i равна

$$f(\varepsilon_i, u_i) = \left(\frac{\lambda}{\sqrt{2\pi\sigma_v}}\right)^p \times \exp\left(\sum_{k=1}^p \left(\varepsilon_i^k \lambda + \frac{\lambda^2 \sigma_v^2}{2}\right)\right) \times \exp\left(-\frac{\sum_{k=1}^p (u_i + (\varepsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2))^2}{2\sigma_v^2}\right). \quad (6)$$

Найдем плотность вероятностей случайной величины ε_i

$$f(\varepsilon_i) = \int_0^\infty f(\varepsilon_i, u_i) du_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{2\pi\sigma_v}}\right)^p \times \frac{\sqrt{2\pi\sigma_v}}{\sqrt{p}} \times \exp\left(\sum_{k=1}^p \left(\varepsilon_i^k \lambda + \frac{\lambda^2 \sigma_v^2}{2}\right)\right) \times \exp\left(-\frac{\sum_{k=1}^p (u_i + (\varepsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2))^2}{2\sigma_v^2}\right) \times \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\sum_{k=1}^p (\varepsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2)}{\sqrt{2\sigma_v}\sqrt{p}}\right)\right). \quad (7)$$

Запишем логарифмическую функцию правдоподобия

$$L(\sigma_v, \lambda, \beta) = n \cdot p \cdot \lambda + (n - np) \ln(\sigma_v) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^p \left(\lambda \left(\ln(y_i^k) - \sum_{j=1}^m \beta_j^k \ln(x_{ij}) \right) + \frac{\lambda^2 \sigma_v^2}{2} \right) - \frac{1}{2\sigma_v^2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^p \left(\lambda \left(\ln(y_i^k) - \sum_{j=1}^m \beta_j^k \ln(x_{ij}) \right) + \lambda\sigma_v^2 \right)^2 + \frac{1}{2\sigma_v^2 p} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^p \lambda \left(\ln(y_i^k) - \sum_{j=1}^m \beta_j^k \ln(x_{ij}) \right) + \lambda\sigma_v^2 \right)^2 + \sum_{i=1}^n \ln \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sum_{k=1}^p \left(\ln(y_i^k) - \sum_{j=1}^m \beta_j^k \ln(x_{ij}) \right) + \lambda\sigma_v^2}{\sqrt{2\sigma_v}\sqrt{p}} \right) \right). \quad (8)$$

Максимизируя эту функцию, найдем параметры $\sigma_v, \lambda, \beta_j^k$. Далее вычислим условную плотность вероятности

$$f(u_i / \varepsilon_i) = \frac{f(u_i, \varepsilon_i)}{f(\varepsilon_i)}. \quad (9)$$

Подставим (2) и (3) в (4), получим

$$f(u_i / \varepsilon_i) = \frac{2\sqrt{p}}{\sqrt{2\pi\sigma_v}} \times \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-\frac{\left(\sum_{k=1}^p (\varepsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2)\right)^2}{2\sigma_v^2 p}}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\sum_{k=1}^p (\varepsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2)}{\sqrt{2\sigma_v}\sqrt{p}}\right)} - \frac{\sum_{k=1}^p (\varepsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2)}{\sqrt{2\sigma_v}\sqrt{p}} \right). \quad (10)$$

Здесь вместо параметров σ_v, λ подставляем их оценки, найденные из решения задачи максимизации (8), а вместо ε_i^k подставим её оценку, вычисленную по формуле (2), в которой используем β_j^k .

Для показателя неэффективности можно получить следующее выражение:

$$u_i = M(u_i / \varepsilon_i) = \frac{\sqrt{2\sigma_v}}{\sqrt{p}} \times \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-\frac{\left(\sum_{k=1}^p (\varepsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2)\right)^2}{2\sigma_v^2 p}}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\sum_{k=1}^p (\varepsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2)}{\sqrt{2\sigma_v}\sqrt{p}}\right)} - \frac{\sum_{k=1}^p (\varepsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2)}{\sqrt{2\sigma_v}\sqrt{p}} \right). \quad (11)$$

Показатель технической эффективности JMLS равен [6, 19]

$$T_{\text{JMLS}} = \exp(-u_i). \quad (12)$$

Показатель технической эффективности будет находиться в интервале

$$\exp(-u_i - \hat{\sigma}_i) \leq T_{\text{JMLS}} = \exp(-u_i) \leq \exp(-u_i + \hat{\sigma}_i), \quad (13)$$

где $\hat{\sigma}_i = \frac{1}{\lambda}$.

Несомненный интерес для практики представляет вероятность того, что неэффективность u_i будет не больше заданного значения (планового значения)

$$up_i: P(u_i \leq up_i) = \int_0^{up_i} f(u_i / \varepsilon_i) du_i.$$

Тогда величину

$$R_i = 1 - P_i = 1 - \int_0^{-\ln(Tp_i)} f(u_i / \varepsilon_i) du_i, i = 1, \dots, n, \quad (14)$$

можно интерпретировать как риск недостижения планового значения эффективности $Tr_i = \exp(-up_i)$ i -м экономическим объектом. Здесь $f(u_i / \epsilon_i)$ определяется формулой (10).

Рассмотрим оценку эффективности ВС [19] $M(e^{-u_i} / \epsilon_i)$.

$$T_{BC} = M(e^{-u_i} / \epsilon_i) = \frac{e^{-\frac{2\sum_{k=1}^p(\epsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2) + \sigma_v^2}{2p}}}{1 - \operatorname{erf}\left[\frac{\sum_{k=1}^p(\epsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2)}{\sqrt{2}\sigma_v\sqrt{p}}\right]} \times \left(1 - \operatorname{erf}\left[\frac{\sum_{k=1}^p(\epsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2) + \sigma_v^2}{\sqrt{2}\sigma_v\sqrt{p}}\right]\right). \quad (15)$$

Вычислим второй момент $M((e^{-u_i})^2 / \epsilon_i)$ эффективности ВС

$$M((e^{-u_i})^2 / \epsilon_i) = \frac{e^{-\frac{2\sum_{k=1}^p(\epsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2) + 2\sigma_v^2}{2p}}}{1 - \operatorname{erf}\left[\frac{\sum_{k=1}^p(\epsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2)}{\sqrt{2}\sigma_v\sqrt{p}}\right]} \times \left(1 - \operatorname{erf}\left[\frac{\sum_{k=1}^p(\epsilon_i^k + \lambda\sigma_v^2) + 2\sigma_v^2}{\sqrt{2}\sigma_v\sqrt{p}}\right]\right). \quad (16)$$

Вариация эффективности ВС равна

$$D_{BC} = \sqrt{M((e^{-u_i})^2 / \epsilon_i) - \left(M(e^{-u_i} / \epsilon_i)\right)^2}. \quad (17)$$

В качестве риска недостижения планового значения эффективности будем использовать величину R_i :

$$R_i = \int_0^{Tr_i} f_T(T_i) dT_i, \quad (18)$$

где

$$f_T(T_i) = f\left(\frac{-\ln(T_i)}{\epsilon_i}\right) \frac{1}{T_i}. \quad (19)$$

Здесь $f\left(\frac{-\ln(T_i)}{\epsilon_i}\right)$ – условная плотность вероятностей, заданная формулой (10).

Характеристика исходных данных

Для исследования было отобрано 35 предприятий за 2011–2020 гг. (20 действующих и 15 предприятий-банкротов). В качестве выходных и входных переменных используется система показателей, которая характеризует финансово-хозяйственную

деятельность предприятий по следующим группам: оценка ликвидности, оценка финансовой устойчивости, оценка деловой активности и оценка рентабельности. В общем насчитывается около 41 коэффициента, по 6–12 в каждой группе. Были исключены дублирующие коэффициенты. Например, был исключен коэффициент оборачиваемости запасов в днях, но включен коэффициент оборачиваемости запасов в оборотах. Для дальнейшей работы необходимо было отобрать показатели, которые являются наиболее значимыми. После предварительной обработки исходных данных в качестве выходных переменных были выбраны два показателя коэффициентов:

- задолженности – показывает долю активов, сформированных в результате привлечения долгового финансирования;
- маневренности оборотного капитала – отражает долю собственных оборотных средств в собственном капитале.

Объясняющими переменными является система из 4 показателей коэффициентов:

- рентабельности,
- финансовой устойчивости,
- деловой активности,
- ликвидности.

Для проведения исследования используем информационно-эмпирическую базу, которой послужат данные из форм обязательной финансовой отчетности: «Бухгалтерский баланс» и «Отчёт о финансовых результатах». Данные были собраны из открытых источников.

Результаты исследования

В таблице приведены результаты расчетов оценок эффективности за 2011–2020 гг. для 35 предприятий.

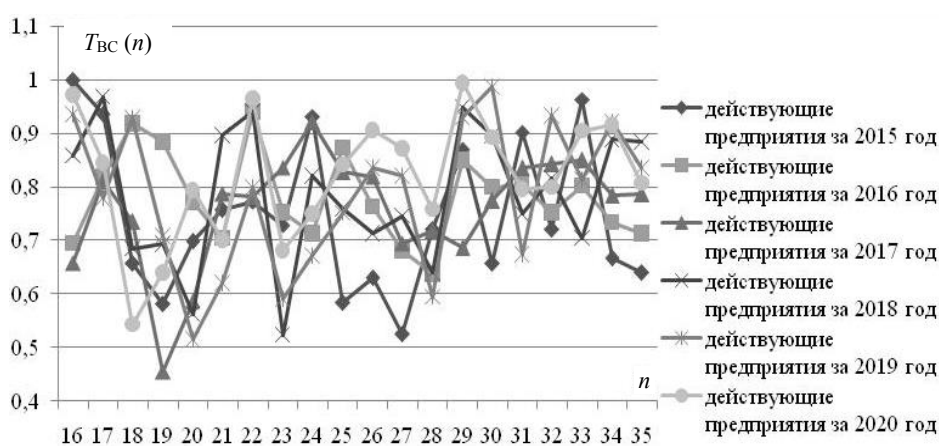
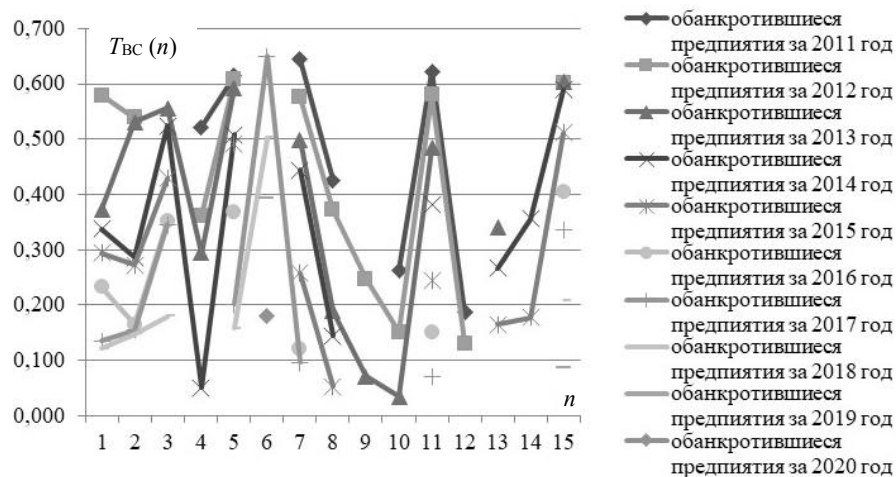
Распределение оценок эффективности многопродуктовой моделью SFA

Значение эффективности	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
0–0,2	1	2	3	2	3	3	4	4	1	1
0,2–0,4	1	3	3	5	4	3	3	1	1	0
0,4–0,6	2	4	5	4	6	1	2	3	3	1
0,6–0,8	3	2	1	0	11	12	11	8	7	8
0,8–1	0	0	0	0	6	8	8	10	10	11

На рис. 1 представлена динамика эффективности финансово-хозяйственной деятельности обанкротившихся предприятий (n).

Наихудшими с точки зрения эффективности являются предприятия, у которых значения показателя эффективности попадают в диапазон от 0 до 0,2. Таким образом, предприятия с 1-го по 15-й подтверждают свой статус «банкрот».

На рис. 2 приведена динамика оценки эффективности действующих предприятий. В данном случае если оценка эффективности приближена к 1, это означает, что предприятие финансово устойчиво и ему не грозит банкротство.



Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о корректности и применимости предложенной многопродуктовой модели SFA для оценки эффективности работы предприятий. Подобные расчеты в известной литературе не выявлены. Преимущество предложенной модификации SFA-модели состоит в том, что исходная информация для расчета финансовых показателей является общедоступной. А данные по используемым ресурсам и объемам выпуска продукции, которые используются в классической модели SFA, в открытом доступе отсутствуют. Второе преимущество состоит в том, что в предлагаемой модели можно использовать несколько выходных показателей. Это позволяет повысить качество получаемых результатов, в то время как в классической SFA-модели используется только один выходной показатель.

В качестве недостатка предлагаемой модели следует указать тот факт, что для корректной работы модели необходимо использовать такие финансовые показатели, которые принимают только положительные значения.

Работа подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект №20-31-90100).

Литература

1. Статистический бюллетень по банкротству на 31 декабря 2021 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fedresurs.ru/news/29f08071-a8ef-4a16-bdc2-bb7559fd1cca>, свободный (дата обращения: 05.02.2022).
2. Altman E. Corporate Financial Distress and Bankruptcy: Predict and Avoid Bankruptcy, Analyze and Invest in Distressed Debt / E. Altman, E. Hotchkiss. – Hoboken: John Wiley and Sons, 2005. – 354 p.
3. Beaver W. Financial Ratios as Predictors of Failure, Empirical Research in Accounting Selected Studies // Journal of Accounting Research. – 1966. – Vol. 4. – P. 71–111.
4. Prediction of bankruptcy Iranian corporations through artificial neural network and probit-based analyses / A. Kasgari, M. Divsalsr, M.R. Javid, S.J. Ebrahimian // Neural Computing and Applications. – 2013. – Vol. 23, No. 3. – P. 927–936.
5. Greene W.A. A gamma-distributed Stochastic frontier model // Journal of Econometrics. – 1990. – Vol. 46. – P. 141–163.
6. Battese G. Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data: With Application to Paddy Farmers in India / G. Battese, T. Coelli // Journal of Productivity Analysis. – 1992. – Vol. 3. – P. 153–169.
7. Eling M. Efficiency in the international insurance industry: A cross-country comparison / M. Eling, M. Luhn // J. of Banking and Finance. – 2010. – Vol. 34. – P. 1497–1509.

8. Борисова Е.И. Анализ эффективности некоммерческих ассоциаций методом стохастической границы (на примере товариществ собственников жилья) / Е.И. Борисова, А.А. Пересецкий, Л.И. Полищук // Прикладная эконометрика. – 2010. – № 4. – С. 75–101.

9. Малахов Д.И. Методы оценки показателя эффективности в моделях стохастической производственной границы / Д.И. Малахов, Н.П. Пильник // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2013. – № 17. – С. 660–686.

10. Афанасьев М.Ю. Модель производственного потенциала с управляемыми факторами неэффективности // Прикладная эконометрика. – 2006. – № 4. – С. 74–89.

11. Могилат А.Н. Техническая эффективность как фактор финансовой устойчивости промышленных компаний / А.Н. Могилат, И.Б. Ипатова // Прикладная эконометрика. – 2016. – № 42. – С. 5–29.

12. Galluzzo N. A technical efficiency analysis of financial subsidies allocated by the cap in Romanian farms using Stochastic frontier analysis // European Countryside. – 2020. – Vol. 12. – P. 494–505.

13. Dynamic network DEA and SFA models for accounting and financial indicators with an analysis of super-efficiency in stochastic frontiers: An efficiency comparison in OECD banking / P. Wanke, M.G. Tsionas, Z. Chen, J. Junio Moreira Antunes // International Review of Economics & Finance. – 2020. – Vol. 69. – P. 456–468.

14. The effect of urban air pollutants in Germany: eco-efficiency analysis through fractional regression models applied after DEA and SFA efficiency predictions. / V. Moutinho, M. Madaleno, P. Macedo // Sustainable Cities and Society. – 2020. – Vol. 59. – P. 2210–6707.

15. Stochastic frontier analysis of productive efficiency in China's Forestry Industry / J. Chen, Y. Wu, M. Song, Z. Zhu // Journal of Forest Economics. – 2017. – Vol. 28, No. 1. – P. 87–95.

16. Ghosh R. The effect of regulatory governance on efficiency of thermal power generation in India: A stochastic frontier analysis / R. Ghosh, V. Kathuria // Energy Policy. – 2016. – Vol. 89. – P. 11–24.

17. Coelli T. An introduction to efficiency and productivity analysis / T. Coelli, R.D.S Prasada, G.E. Battese. – Boston: Kluwer Academic, 1998. – 256 p.

18. Battese G.E. Prediction of Firm-level Technical Efficiencies: With a Generalized Frontier Production Function and Panel Data / G.E. Battese, T.J. Coelli // Journal of Econometrics. – 1988. – Vol. 38. – P. 387–399.

19. On the Estimation of Technical Inefficiency in Stochastic Frontier Production Function Model / J. Jondrow, C.A.K. Lovell, I.S. Materov, P. Schmidt // Journal of Econometrics. – 1982. – Vol. 19. – P. 233–239.

Мицель Артур Александрович

Д-р техн. наук, проф. каф. АСУ ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0002-2624-4383

Тел.: 8-923-430-52-90

Эл. почта: maa@asu.tusur.ru

Alimkhanova A.N., Mitsel A.A.

Multi-product model for assessing the effectiveness of the safe operation of enterprises

The concept of efficiency is very important in economic science, and today it has its increasing role in each sector of the economy. The evaluation of the efficiency of the enterprise allows to carry out a faithful and advantageous resource allocation strategy, and shows its potential level. There are various methods and models for assessing the efficiency of enterprises. This paper presents an assessment of the efficiency of enterprises by the Stochastic Frontier Analysis method. The results of the work showed how the efficiency of various enterprises of same industry will change in several years. It is shown that such a model can be used to assess the financial stability and bankruptcy prediction.

Keywords: multifactor model, efficiency, stochastic method, bankruptcy, financial stability, panel data

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-107-113

References

1. Statistical bankruptcy bulletin on December 31, 2021. Available at: <https://fedresurs.ru/news/29f08071-a8ef-4a16-bdc2-bb7559fd1cca>, free (Accessed: February 05, 2022) (in Russ).
2. Altman E. Hotchkiss E. *Corporate Financial Distress and Bankruptcy: Predict and Avoid Bankruptcy, Analyze and Invest in Distressed Debt*. Hoboken, John Wiley and Sons, 2005, 354 p.
3. Beaver W. Financial Ratios as Predictors of Failure, Empirical Research in Accounting Selected Studies. *Journal of Accounting Research*, 1966, vol. 4, pp. 71–111.
4. Kargari A., Divsalsr M., Javid M.R., Ebrahimi S.J. Prediction of bankruptcy Iranian corporations through artificial neural network and probit-based analyses. *Neural Computing and Applications*, 2013, vol. 23, no 3, pp. 927–936.
5. Greene W.A. A gamma-distributed stochastic frontier model. *Journal of Econometrics*, 1990, vol. 46, pp. 141–163.
6. Battese G., Coelli T. Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data: With Application to Paddy Farmers in India. *Journal of Productivity Analysis*, 1992, vol. 3, pp. 153–169.
7. Eling M., Luhn M. Efficiency in the international insurance industry: A cross-country comparison. *Journal of Banking and Finance*, 2010, vol. 34, pp. 1497–1509.
8. Borisova E., Peresetsky A., Polishchuk L. [Stochastic frontier in non-profit associations' performance assessment (the case of homeowners' associations)]. *Applied Econometrics*, 2010, no. 4, pp. 75–101.
9. Malakhov D., Pilnik N. [Methods of Estimating of the Efficiency in Stochastic Frontier Models]. *Ekonomicheskii zhurnal VSE*, 2013, no. 17, pp. 660–686 (in Russ).
10. Afanasiev M. [A Model of the Production Potential with Managed Factors of Inefficiency]. *Applied Econometrics*, 2006, no. 4, pp. 74–89 (in Russ).
11. Mogilat A. Ipatova I. [Technical efficiency as a factor of Russian industrial companies' risks of financial distress]. *Applied Econometrics*, 2016, no. 42, pp. 5–29 (in Russ).

Алимханова Алия Нуржановна

Аспирантка каф. автоматизированных систем управления

(АСУ) Томского государственного университета систем

управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0003-0964-1659

Тел.: 8-996-937-09-27

Эл. почта: aan@asu.tusur.ru

12. Galluzzo N. A technical efficiency analysis of financial subsidies allocated by the cap in Romanian farms using Stochastic frontier analysis. *European Countrywide*, 2020, vol. 12, pp. 494–505.
13. Wanke P., Tsionas M.G., Chen Z., Junio Moreira Antunes J. Dynamic network DEA and SFA models for accounting and financial indicators with an analysis of super-efficiency in stochastic frontiers: An efficiency comparison in OECD banking. *International Review of Economics & Finance*, 2020, vol. 69, pp. 456–468.
14. Moutinho V, Madaleno M., Macedo P. The effect of urban air pollutants in Germany: eco-efficiency analysis through fractional regression models applied after DEA and SFA efficiency predictions. *Sustainable Cities and Society*, 2020, vol. 59, pp. 2210–6707.
15. Chen J., Wu Y., Song M., Zhu Z. Stochastic frontier analysis of productive efficiency in China's Forestry Industry. *Journal of Forest Economics*, 2017, vol. 28, no. 1, pp. 87–95.
16. Ghosh R., Kathuria V. The effect of regulatory governance on efficiency of thermal power generation in India: A stochastic frontier analysis. *Energy Policy*, 2016, vol. 89, pp. 11–24.
17. Coelli T, Prasada R.D.S, Battese G.E. *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. Boston, Kluwer Academic, 1998, 256 p.
18. Battese G.E., Coelli T.J. Prediction of Firm-level Technical Efficiencies: With a Generalized Frontier Production Function and Panel Data. *Journal of Econometrics*, 1988, vol. 38, pp. 387–399.
19. Jondrow J., Lovell C.A.K., Materov I.S., Schmidt P. On the Estimation of Technical Inefficiency in Stochastic Frontier Production Function Model. *Journal of Econometrics* 1982, vol. 19, pp. 233–239.

Aliya N. Alimkhanova

Postgraduate student, Department of Automated Control Systems (ACS), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-2624-4383
Phone: +7-996-937-09-27
Email: aan@asu.tusur.ru

Artur A. Mitsel

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of ACS, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-2624-4383
Phone: +7-923-430-52-90
Email: maa@asu.tusur.ru

УДК 378.147.88

А.Г. Буймов

Проблема управления учебным поведением недостаточно мотивированных студентов на этапе освоения исследовательских компетенций

Пошаговое освоение образовательной программы в рамках стратегии «выучил–сдал» для большинства студентов проблемой не является. Другое дело – их дальнейшее развитие с увеличением доли самостоятельной индивидуальной работы и поиском творческих решений на этапе освоения исследовательских компетенций. Это трудный процесс, и на его успешное прохождение не у всех студентов хватает мотивации. В статье обсуждается идея стимулирования к обучению именно таких студентов.

Ключевые слова: освоение исследовательских компетенций, мотивация к обучению, стимулирование.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-114-119

Специфика образовательного процесса наделяет студента тремя существенно различными ипостасями. Он одновременно и клиент, и активный участник (работник), и продукт этого процесса. Чтобы этот «продукт» пользовался спросом на рынке труда, он должен удовлетворять требованиям рынка. За этим он идет в университет и, становясь его «клиентом», рассчитывает на предоставление условий (материальных и нематериальных), способствующих достижению поставленной цели. Далее он включает в себе «работника», становится активным участником образовательного процесса. Без этого достичь цели не удастся.

Из этой схемы видно, что ключевыми факторами качества образования в университете являются: а) согласование требований образовательных стандартов и программ с требованиями рынка труда; б) обеспечение материальных и нематериальных условий выполнения этих требований; в) высокий уровень мотивации студентов к обучению.

Современная динамика внешней среды приводит к росту уровня «фоновых искушений» и деформации приоритетов, в результате чего возникает проблема управления мотивацией некоторых студентов, снижается качество образования, растет вероятность плагиата и других форм «академического мошенничества». Традиционные теории мотивации этих тенденций не учитывают, как не учитывают и индивидуальные особенности учебного поведения студентов. Не дают ответа на вопрос, что и в каком случае следует делать. Требуются новые идеи и методы решения обсуждаемой проблемы.

Студент как «клиент»

Усиление конкуренции вузов за лояльность студентов из экономических соображений стало в 1990-х причиной внедрения в университетах идеи интерпретации образовательного процесса как процесса обслуживания студентов как клиентов. Одной из наиболее популярных моделей критериев качества обслуживания с этих позиций является модель SERVQUAL с ключевыми аспектами – «осязаемость» (наличие необходимого персонала, оборудования, коммуникаций); «надежность» (способность персонала точно и надежно выполнять обещания); «отзывчивость» (готовность вовремя помочь клиен-

ту в ответ на его просьбу); «гарантия» (знания и вежливость персонала, внушающие чувство доверия и уверенности); «сопереживание» (забота и индивидуальный подход к клиенту) [1].

Исследования с применением SERVQUAL и других подобных моделей в образовании показали, что перечисленные в них характеристики качества обслуживания положительно связаны с удовлетворенностью студентов своим вузом [2]. Кроме того, считается доказанным, что первичными детерминантами удовлетворенности студентов в системе высшего образования являются поведение и отношение преподавателей. От них ждут эрудиции, справедливости, надежности, полезности, дружелюбия и чувства юмора. Такие факторы, как доступность, знание предмета, готовность помочь, логическая структура лекций, уважительное отношение к студенту, считаются обязательными. Дефицит этих свойств вызывает сильную неудовлетворенность [3].

Изучение роли перечисленных характеристик в удовлетворенности студентов своими учебными заведениями продолжается [4, 5]. При этом, как правило, не обращается внимания на то, что эти характеристики определяют лишь контекст, комфортность рабочей атмосферы учебного процесса, но не *гарантируют высокой мотивации студентов к обучению*.

В статье [6] отмечается, что плата за обучение изменила ожидания студентов и отношение к высшему образованию. Есть студенты, которые воспринимают себя как покупателей услуг и не считают важным принимать активное участие в учебном процессе: «за качество отвечают преподаватели». При этом игнорируется тот факт, что *обучение является индивидуальной деятельностью, и от индивидуальной приверженности к обучению зависит индивидуальность результатов*.

Автор статьи [7] считает, что для вовлечения студента в активную работу надо пробудить в нем «работника». В противном случае его активность в учебном процессе окажется под угрозой. В итоге получается, что в образовательном процессе можно четко выделить два типа ожиданий взаимодействующих сторон – ожиданий студентов и ожиданий преподавателей. Студенты ждут от вуза удовлетво-

рения своих «клиентских» ожиданий относительно условий обучения, поведения и отношения преподавателей, а преподаватели мечтают об активной приверженности студентов к обучению.

Студент как «работник»

Первым на существование и необходимость учета двух типов факторов, определяющих отношение людей к выполнению рабочих заданий, указал американский психолог Фредерик Герцберг (см.: <https://www.koob.ru/herzberg/>). На основе опросов двух сотен инженеров и бухгалтеров одной из крупных компаний он пришел к выводу, что людей, которые вошли в его выборку, можно разделить по типам требований к работе на две группы. Одна ориентирована на профессиональный рост, другая озабочена состоянием факторов контекста. Факторы контекста, характеризующие условия выполнения работы, Герцберг предложил называть *гигиеническими факторами*, а факторы, возбуждающие желание работать, – *мотиваторами*. К списку гигиенических факторов, способных вызывать сильную неудовлетворенность и раздражение людей, были отнесены *политика компании, правила распределения зарплаты, отношения с руководством, условия работы и контроль*. К наиболее активным мотиваторам, способствующим актуализации творческих способностей исполнителей и желанию выполнять работу с высоким качеством, – *достижение, признание, интерес к работе, ответственность, продвижение по службе* [8].

Для поддержки мотивации исполнителей, ориентированных на профессиональный рост, Герцберг рекомендует планировать задания так, чтобы они вызывали *интерес*, требовали от работника *самостоятельности* и *ответственности*, а сам процесс и результат работы вызывали чувство *достижения*.

У Герцберга нет рекомендаций по стимулированию работников, у которых нет особого интереса к профессиональному росту. Он считает, что в любом случае надо удовлетворять гигиенические потребности всех людей компании, чтобы одним не мешать расти, других – уберечь от разочарования в работе и понижения качества ее выполнения.

Российский социолог и экономист В.И. Герчиков критикует теорию Герцберга за то, что в ней не предусмотрен учет индивидуальности работника и согласованности его характеристик с характеристиками рабочего задания. В модели Герчикова работники отличаются типами трудовой мотивации (мотивации достижения – мотивации избегания) и типами трудового поведения (конструктивного–деструктивного) [9, 10]. Конструктивное поведение работника в случае мотивации достижения в этой модели может соответствовать ситуации успешного выполнения задания. Конструктивное поведение в случае мотивации избегания – отвечает варианту с *минимально допустимым уровнем выполнения работы*, при котором еще можно избежать наказания. Причинами деструктивного поведения работников с мотивацией достижения может быть, в частности,

неудовлетворительное состояние поддерживающих (гигиенических) факторов, кажущаяся или имеющая место несправедливость, недооценка полученных результатов. К причинам деструктивного поведения в случае мотивации избегания можно еще добавить недостаточную ответственность за выполняемую работу или отсутствие необходимых навыков. К основным видам стимулирования работников «деструктивно-избегательного» типа Герчиков относит *наказания, воспитательную работу и наставничество*. По сути, рекомендации Герчикова по стимулированию работников всех типов мотивации и поведения сводятся к индивидуализации выбора и настройки гигиенических факторов мотивации Герцберга – созданию согласованных с типом исполнителя условий успешного выполнения работ и справедливой оценки результатов.

Применительно к студенческой аудитории типологию Герчикова можно представить таблицей, изображенной на рис. 1.

Конструктивное поведение			
Мотивация избегания	<p>Мотив избегания Нет особого интереса к профессиональному росту. Задания выполняются на невысоком, но приемлемом (чтобы избежать неприятностей) уровне, и не всегда в срок</p>	<p>Мотив достижения Интерес к профессиональному росту. Удовлетворение мотивационных ожиданий. Высокая успеваемость</p>	Мотивация достижения
	<p>Мотив избегания Академическая нечестность. Поиск «виноватых». Привлечение «адвокатов»</p>	<p>Мотив достижения Неудовлетворенность мотивационных ожиданий. Недовольство гигиеническими факторами</p>	
Деструктивное поведение			

Рис. 1. Типы учебного поведения студентов с позиций теории В.И. Герчикова

Левый верхний квадрант отражает тип «конструктивное поведение при мотивации избегания». Это тот же тип людей, которые в модели Герцберга отличаются недостаточным уровнем ответственности за выполняемую работу и отсутствием особого интереса к профессиональному росту. И это тот тип, который, согласно результатам социологического обследования [11], весьма распространен в студенческой среде. Были опрошены 3162 студента из 53 вузов. Более половины из них признали средний уровень собственных усилий в учебе и невысокий интерес к будущей профессии [11, с. 281, 286]. Из-за своей массовости именно этот тип студентов требует особого внимания.

Этапы освоения компетенций. Роли ученика и исследователя

Исследователи проблем качества высшего образования ищут варианты повышения приверженности студентов к обучению. Авторы ряда публикаций (см., например, [12, 13]) предлагают действовать

путем поиска стимулов привлечения студентов к разработке и испытаниям интересных образовательных проектов, рекомендуют приобщать их к исследованиям, начиная с первого курса [14, 15], считают необходимым использовать частую, своевременную и конструктивную обратную связь для оценки прогресса своих молодых «сотрудников». Студенты при этом ждут большей открытости преподавателей для общения, возможности своего участия в разработке и принятии решений, понятного определения и распределения ролей, открытых перспектив роста [16]. Очень полезные рекомендации, но – для работы с мотивированными студентами. Вернемся к нашему объекту исследования – работе студентов с недостаточным уровнем мотивации к высокому качеству освоения исследовательских компетенций.

Есть важное замечание: авторы публикации [17], обсуждая разные варианты организации исследований, предлагают четко определять, что в каждом конкретном случае является наиболее важным – развитие студента или получение научного результата. В работах [15, 18] эта идея реализуется через разбиение полной программы освоения исследовательских компетенций на четыре самостоятельных этапа. Программы этапов отличаются ролями студента, «ученик» или «исследователь», и акцентом внимания на содержании исследования или на его процессе. На рис. 2 предложена интерпретация этих этапов как элементов популярной структуры подготовки научных публикаций IMRAD [19].

Работа в «поле» (студент как исследователь)		
Акцент на содержании результатов	Discussion (обсуждение) Подготовка публикации	Results (получение результатов). Участие в проведении исследований
	Introduction («погружение» в проблему). Изучение научных публикаций по теме исследования. Диагностика проблемы. Постановка задачи	Methods (технологическая подготовка исследования). Изучение, выбор, подготовка методов, материалов и техник исследования
«Кабинетные» исследования (студент как ученик)		
Акцент на процессе исследования		

Рис. 2. Этапы освоения исследовательских компетенций, согласованные с моделью IMRAD

В рекомендациях теории проектирования работы Дж. Хэкмана и Г. Олдхэма (см.: https://en.wikipedia.org/wiki/Job_characteristic_theory) подчеркивается необходимость формулировать каждое рабочее задание так, чтобы его выполнение воспринималось исполнителем как получение *конкретного, видимого, важного* результата. Разбиение цикла освоения исследовательских компетенций на четыре логически обособленных этапа IMRAD с понятными достижимыми целями отвечает этим рекомендациям.

Перечисленные этапы достаточно сложны и трудоемки. Для их упрощения можно попробовать разбить полные программы этапов на ряд абсолютно выполнимых заданий, решения которых (по Дж. Коттеру [20]) должны быть:

- а) непосредственно связаны с освоением исследовательских компетенций на соответствующем этапе;
- б) восприниматься студентами и преподавателями как очевидные достижения;
- в) ценность этих достижений не должна вызывать сомнений.

В основу такого разбиения, в частности, может быть положено чередование учебных и исследовательских целей внутри каждого этапа. В первую очередь, это относится к этапам «Погружение в проблему» и «Технологическая подготовка исследований» (см. рис. 2), которые логично начинать с целевой, «адаптационной» индивидуальной или групповой подготовки или переподготовки студентов, находящихся в роли ученика, к самостоятельному выполнению предусмотренной этапом программы исследований.

Гипотеза о стимулирующем эффекте целевой подготовки

Для осознания возможных эффектов включения целевой подготовки в процессы освоения исследовательских компетенций обратимся к обобщенной теории ожиданий П. Стила и К. Кенига [21]. Эта теория учитывает время как один из факторов мотивации и стимулирования работ. На рис. 3 приведены графики, построенные по ее формулам.

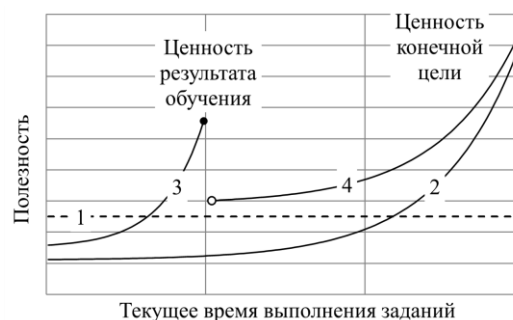


Рис. 3. Иллюстрация гипотезы о стимулирующем эффекте целевой подготовки студента к самостоятельному выполнению исследовательских заданий

Пунктирной линией 1 обозначен уровень «фоновых искушений», отвлекающих студента от выполнения полученных заданий. Кривая 2 иллюстрирует изменение воспринимаемой полезности конечной цели задания в зависимости от приближения к этой цели. Пока цель далека, она не воспринимается ни как важная, ни как срочная, и при высоком уровне отвлекающих факторов работа над ней может откладываться до последнего момента. В результате времени на выполнение работ с высоким качеством не остается – типичная ситуация для плохо подготовленных и слабо мотивированных студентов.

Поведение кривых 3 и 4 отвечает гипотезе о стимулирующем эффекте целевой подготовки. Кривая 3 отражает динамику восприятия студентом полезности учебного задания, выполняемого под руководством и контролем преподавателя. Размещение начальной точки графика субъективной полезности исследовательского задания (кривая 4) выше уровня «фоновых искушений» соответствует предположению о том, что целевая подготовка может усилить интерес студента к продолжению исследований и стать стимулом немедленного перехода к применению только что полученных знаний.

Успех обсуждаемой стратегии освоения исследовательских компетенций студентами зависит, конечно, не только от типа мотивации и поведения студентов (см. рис. 1), но также от поведения и отношения преподавателей, от которых ждут эрудиции, знания предмета, уважительного отношения к студенту, доступности, справедливости и готовности помочь [3]. Для уточнения и конкретизации этих ожиданий используем основные положения теории мотивации Дж. Келлера [22]. При этом ее ARCS-модель будем интерпретировать как подсказку о необходимости освоения преподавателями целевой подготовки следующих умений:

A (Attention) – заинтересовать, привлечь внимание студента к сути и цели учебного задания и его связи с содержанием соответствующего этапа исследований IMRAD (см. рис. 2);

R (Relevance & Responsibility) – донести до студента понимание актуальности, важности данного задания, необходимости его выполнения и *ответственности обеих сторон* за качество освоения предлагаемых знаний;

C (Confidence & Tutoring) – помочь студенту в приобретении уверенности и развитии способности к достижению поставленных целей, провести соответствующие *занятия и консультации*; помочь с выбором темы, объекта и предмета исследования;

S (Satisfaction & Action) – способствовать получению студентом положительных эмоций от процесса и факта успешного выполнения учебного задания; обсудить результаты, предоставить позитивную обратную связь; обсудить перспективы и планы дальнейших действий.

При желании подчеркнуть назначение этих умений их можно также назвать компетенциями целевой подготовки, или стимулирующей поддержки, адаптации, репетиторства. Преподавателю при этом (по Дж. Келлеру) следует спросить себя, владеет ли он этими компетенциями.

Ожидаемые результаты

Ожидаемый эффект применения данного варианта ARCS-компетенций в задачах стимулирующей подготовки студентов к выполнению исследовательских заданий заключается в позитивном изменении отношения к этой работе. Графически этот эффект иллюстрируется различием в поведении кривых 3, 4 на рис. 3 по сравнению с кривой 2.

При успешном применении перечисленных компетенций могут быть достигнуты следующие результаты:

1) у студента формируется четкое видение предстоящей самостоятельной работы в роли исследователя, он понимает задачу и хорошо подготовлен к ее выполнению;

2) успешное выполнение подготовительных заданий повышает уверенность студента в своих силах, сопровождается положительными эмоциями и становится дополнительным стимулом для быстрого перехода к самостоятельному решению исследовательских задач;

3) на групповом уровне при этом должно наблюдаться повышение качества выполняемых работ и уменьшение вероятности необоснованного нарушения графиков их выполнения.

Для измерения и контроля текущих результатов должны быть разработаны соответствующие наборы индивидуальных подготовительных и исследовательских заданий. Особое внимание следует уделить моменту перехода от теории к практике, когда полученные результаты и смена вида деятельности сопровождаются переоценкой полезности выполняемой работы (см. разрыв между кривыми 3, 4 на рис. 3). Внимание к этому моменту целесообразно усилить проведением специальной контрольной точки, направленной на сокращение времени перехода к исследованиям с применением только что полученных знаний. Необходимость скорого практического применения получаемых знаний, стимулируемая такой контрольной точкой, одновременно повышает и субъективно воспринимаемую полезность их освоения.

Заключение

В статье сформулирована и обоснована идея повышения уровня профессиональной подготовки студентов с невысокой мотивацией к освоению исследовательских компетенций. Идея основана на постепенном приучении таких студентов, предпочитающих находиться в роли «ученика», к решению исследовательских задач через выполнение нескольких достаточно простых учебных заданий в рамках привычной стратегии «выучил–сдал».

Перспективы внедрения этой идеи могут зависеть не только от оценки ее полезности студентами, но и от оценки трудоемкости ее осуществления преподавателями. Вопросы, связанные с перспективами, требуют дальнейшего изучения.

Литература

1. Zafriopoulos K. Students' attitudes about educational service quality // The Cyprus Journal of Sciences. – 2006. – Vol. 4. – P. 3–23.
2. Higher Education Quality and Student Satisfaction Nexus: Evidence from Zambia / B. Mwiya, J. Bwalya, B. Siachinji, S. Sikombe, H. Chanda, M. Chawala // Creative Education. – 2017. – Vol. 8. – P. 1044–1068.
3. Gruber T. Understanding the characteristics of effective professors: the student's perspective / T. Gruber, A. Rep-

- pel, R. Voss // *Journal of Marketing for Higher Education*. – 2010. – Vol. 20, Iss. 2. – P. 175–190.
4. Bonlagic S. Quality assessment in higher education using the SERVQUAL model / S. Bonlagic, S. Fazlic // *Management*. – 2015. – Vol. 20, No. 1. – P. 39–57.
5. The Quality Assessment of Educational Services Based on Perception and Expectations of Students in Tabriz University of Medical Sciences / M. Gholizadeh, F. Valizadeh, A. Janati, R. Khodayari-Zarnaq, V. Mousazadeh // *FMEJ*. – 2020. – Vol. 10, Iss. 4. – P. 8–14.
6. Cheng M. Reclaiming Quality in Higher Education: A Human Factor Approach // *Quality in Higher Education*. – 2017. – Vol. 23, No. 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://ueaeprints.uea.ac.uk/id/eprint/65553/1/Quality_in_HE_M_Cheng.pdf, свободный (дата обращения: 01.03.2022).
7. George D. Market overreach: The student as customer // *Journal of Socio-Economics*. – 2007. – Vol. 36, No. 6. – P. 965–977.
8. Херцберг Ф. Мотивация к работе / Ф. Херцберг, Б. Моснер, Б. Блох Снидерман; пер. с англ. Д.А. Куликов. – М.: Вершина. – 2007. – 240 с. – URL: <https://www.klex.ru/g4g> (дата обращения: 01.03.2022).
9. Герчиков В.И. Типологическая концепция трудовой мотивации: ч. 1 // *Мотивация и оплата труда*. – 2005. – No. 2. – С. 53–62.
10. Герчиков В.И. Типологическая концепция трудовой мотивации: ч. 2 // *Мотивация и оплата труда*. – 2005. – No. 3. – С. 2–6.
11. Плюснин Ю.М. Посещать, а не учиться. Троечники и отличники в университете // *Вопросы образования*. – 2007. – № 2. – С. 277–292.
12. Kuh G. High-impact educational practices: What they are, who has access to them, and why they matter. – Washington, DC: Association of American Colleges and Universities. – 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.aacu.org/node/4084>, свободный (дата обращения: 01.03.2022).
13. Healey M. Engagement through Partnership: Students as Partners in Learning and Teaching in Higher Education / M. Healey, A. Flint, K. Harrington // *The Higher Education Academy Report*. – 2014. – No. 21(1) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://www.researchgate.net/publication/264240134_Engagement_through_partnership_students_as_partners_in_learning_and_teaching_in_higher_education, свободный (дата обращения: 01.03.2022).
14. Anchal Garg. Research Skills Future in Education: Building Workforce Competence. Research Report 1. Do We Cultivate Research Skills? Veracity versus Falsity / Anchal Garg, Madhulika, Don Passey. – Department of Educational Research, Lancaster University. – 2019. – P. 1–33 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/89496/1/Research_Skills_Research_Report_1_final.pdf, свободный (дата обращения: 01.03.2022).
15. Jenkins, A. Undergraduate research and international initiatives to link teaching and research / A. Jenkins, M. Healey // *CUR Quarterly*. – 2010. – Vol. 30, No 3. – P. 36–42.
16. A students' take on student-staff partnerships: experiences and preferences / S. Martens, A. Spruijt, I. Wolfhagen, J. Whittingham, D. Dolmans // *Assessment & Evaluation in Higher Education*. – 2019. – Vol. 44, No. 6. – P. 910–919.
17. Beckman M. Making explicit the implicit: defining undergraduate research / M. Beckman, N. Hensel // *CUR Quarterly*. – 2009. – Vol. 29(4). – P. 40–44.
18. Slapcoff M. The Inquiry Network: A model for promoting the teaching-research nexus in higher education / M. Slapcoff, D. Harris // *Canadian Journal of Higher Education Revue*. – 2014. – Vol. 44, No. 2. – P. 68–84.
19. Субачев Ю.В. Подробный разбор структуры научной статьи IMRAD с рекомендациями // *Научные переводы*. Обновлено 26.05.2020. – URL: <https://xn--80aegcaabcbngm5a6c1ci.xn--p1ai/razbor-struktury-stati-imrad/> (дата обращения: 01.03.2022).
20. Джон П. Коттер. Впереди перемен. – М.: Олимп-Бизнес, 2014. – 256 с.
21. Steel P. Integrating theories of motivation / P. Steel, C.J. Konig // *Academy of Management Review*. – 2006. – Vol. 31, No. 4. – P. 889–913.
22. Keller J.M. Development and use of the ARCS model of motivational design // *Journal of Instructional Development*. – 1987. – No. 10 (3). – P. 2–10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Development-and-Use-of-the-ARCS-Model-of-Instructional-Design.pdf>, свободный (дата обращения: 01.03.2022).

Буймов Аркадий Георгиевич

Д-р техн. наук, проф. каф. экономики
Томского государственного университета систем
управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-827-40-76
Эл. почта: agb2005@yandex.ru

Buymov A.G.

The problem of managing the learning behavior of insufficiently motivated students at the stage of mastering research competencies

Mastering the educational program within the framework of the «subject study – testing and exams» strategy is not a problem for the bigger part of students. Another thing is their further development, when the share of independent individual work and the search for creative solutions increases at the stage where they are supposed to acquire research competencies. This is a complex process, and not all students have enough motivation to successfully complete it. The article discusses the ideas of stimulating such students to study.

Keywords: mastering research competencies, motivation to learn, stimulation.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-114-119

References

- Zafiroopoulos, K. Students' attitudes about educational service quality. *The Cyprus Journal of Sciences*, 2006, vol. 4, pp. 3–23.
- Mwiya B., Bwalya J., Siachinji B., Sikombe S., Chanda H., Chawala M. Higher Education Quality and Student Satisfaction Nexus: Evidence from Zambia // *Creative Education*, 2017, vol. 8, pp. 1044–1068.
- Gruber T., Reppel A., Voss R. Understanding the characteristics of effective professors: the student's perspective *Journal of Marketing for Higher Education*, 2010, vol. 20, iss. 2, pp. 175–190.
- Bonlagic S., Fazlic S. Quality assessment in higher education using the SERVQUAL model, *Management*, 2015, vol. 20, no 1, pp. 39–57.
- Gholizadeh M., Valizadeh F., Janati A., Khodayari-Zarnaq R., Mousazadeh V. The Quality Assessment of Educa-

tional Services Based on Perception and Expectations of Students in Tabriz University of Medical Sciences, *Future of Medical Education Journal*, 2020, vol. 10, iss. 4, pp. 8–14.

6. Cheng M. Reclaiming Quality in Higher Education: A Human Factor Approach, *Quality in Higher Education*, 2017, vol. 23, no 3. Available at: https://ueaeprints.uea.ac.uk/id/eprint/65553/1/Quality_in_HE_M_Cheng.pdf (Accessed: March 01, 2022).

7. George D. Market overreach: The student as customer. *Journal of Socio-Economics*, 2007, vol. 36, no. 6, pp. 965–977.

8. Herzberg F., Mosner Bloch Sniderman, B. *Motivatsiya k rabote* [Motivation to work], translated from English D.A. Kulikov. Moscow, Vershina, 2007, 240 p. (in Russ) – Available at: <https://www.klex.ru/g4g> (Accessed: March 01, 2022).

9. Gerchikov V.I. *Tipologicheskaya koncepciya trudovoj motivatsii (chast' 1)* [Typological concept of labor motivation (part 1)], *Motivation and Remuneration*, 2005, no 2, pp. 53–62 (in Russ)

10. Gerchikov V.I. *Tipologicheskaya koncepciya trudovoj motivatsii (chast' 2)* [Typological concept of labor motivation (part 2)], *Motivation and Remuneration*, 2005, no. 3, pp. 2–6 (in Russ)

11. Plyusnin Y.M. *Poseshchat', a ne učit'sya. Troechniki i otlichniki v universitete* [Attend, not study. Triples and excellent students at the university], *Questions of Education*, 2007, no. 2, pp. 277–292 (in Russ)

12. Kuh G. High-impact educational practices: What they are, who has access to them, and why they matter. – Washington, DC: *Association of American Colleges and Universities*, 2008. Available at: <https://www.aacu.org/node/4084>. (Accessed: March 01, 2022).

13. Healey M., Flint A., Harrington, A. Engagement through Partnership: Students as Partners in Learning and Teaching in Higher Education, *The Higher Education Academy Report*, 2014, 21 (1). Available at: https://www.researchgate.net/publication/264240134_Engagement_through_partnership_students_as_partners_in_learning_and_teaching_in_higher_education (Accessed: March 01, 2022).

14. Anchal Garg, Madhulika Don Passey. Research Skills Future in Education: Building Workforce Competence. Research Report 1. Do We Cultivate Research Skills? Veracity versus Falsity, *Department of Educational Research, Lancaster University*, 2019, pp. 1–33. Available at: http://eprints.lancs.ac.uk/89496/1/Research_Skills_Research_Report_1_final.pdf (Accessed: March 01, 2022).

15. Jenkins A., Healey M. Undergraduate research and international initiatives to link teaching and research, *CUR Quarterly*, 2010, vol. 30, no. 3, pp. 36–42.

16. Martens S., Spruijt A., Wolfhagen I., Whittingham J. & Dolmans D. A students' take on student-staff partnerships: experiences and preferences, *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 2019, vol. 44, no. 6, pp. 910–919.

17. Beckman M., Hensel N. Making explicit the implicit: defining undergraduate research, *CUR Quarterly*, 2009, vol. 29(4), pp. 40–44.

18. Slapcoff M., Harris D. The Inquiry Network: A model for promoting the teaching-research nexus in higher education, *Canadian Journal of Higher Education Review*, 2014, vol. 44, no. 2, pp. 68–84.

19. Subachev Yu.V. *Podrobnij razbor struktury nauchnoj stat'i IMRAD s rekomendacijami* [A detailed analysis of the structure of the IMRAD scientific article with recommendations], *Scientific translations*. Updated on 05/26/2020, (in Russ). Available at: <https://xn--80aegcaa6cbngm5a6c1ci.xn--p1ai/razbor-struktury-stati-imrad/>. (Accessed: March 01, 2022).

20. John P. Kotter. *Vperedí peremen* [Ahead of the changes]. M.: Olimp-Business, 2014, 256 p. (in Russ). Available at: <https://baguzin.ru/wp/dzhon-p-kotter-vperedí-peremen> (Accessed: March 01, 2022).

21. Steel P., König C.J. Integrating theories of motivation, *Academy of Management Review*, 2006, vol. 31, no. 4, pp. 889–913.

22. Keller J.M. Development and use of the ARCS model of motivational design, *Journal of Instructional Development*, 1987, 10(3), pp. 2–10. Available at: <https://ocw.tu-delft.nl/wp-content/uploads/Development-and-Use-of-the-ARCS-Model-of-Instructional-Design.pdf> (Accessed: March 01, 2022).

Arkady G. Buymov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Economics, Tomsk State
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-827-40-76
Email: agb2005@yandex.ru

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.316.72

М.П. Сухоруков

Энергопреобразующая аппаратура высоковольтных систем электропитания космических аппаратов с цифровой системой управления*

Представлены результаты разработки экспериментального образца энергопреобразующей аппаратуры высоковольтных систем электропитания автоматических космических аппаратов выходной мощностью 2,5 кВт с распределенной цифровой системой управления. Приведены результаты экспериментальных исследований статических и динамических характеристик. Распределенная цифровая система управления обеспечивает заданные характеристики качества выходного напряжения и отработку задающих и возмущающих воздействий.

Ключевые слова: энергопреобразующая аппаратура, система электропитания, цифровая система управления, космический аппарат.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-123-128

Одной из важнейших бортовых систем автоматических космических аппаратов (КА) является система электропитания (СЭП), которая представляет собой совокупность первичных, буферных источников энергии и энергопреобразующую аппаратуру (ЭПА) с необходимой автоматикой контроля и управления [1, 2]. В качестве первичных источников энергии широко применяют солнечные батареи (СБ). В качестве буферных источников энергии обычно используют аккумуляторные батареи (АБ).

Регулирование потоков энергии в СЭП КА осуществляется ЭПА [3], которая обеспечивает заданное качество электропитания на выходных шинах и оптимальные режимы работы источников энергии в течение всего времени функционирования СЭП КА. В состав ЭПА, как правило, входят: разрядные устройства (РУ), зарядные устройства (ЗУ) и регуляторы напряжения солнечной батареи.

При разработке СЭП автоматических КА необходимо учитывать множество возмущающих воздействий, влияющих на качество выходного напряжения (100 ± 1 В). К таким воздействиям относятся изменения сопротивления нагрузки, напряжений и мощностей СБ и АБ.

Система автоматического управления энергопреобразующей аппаратуры должна учитывать возмущающие воздействия и с заданной точностью обеспечивать стабильное напряжение на шине питания бортовых потребителей энергии и работу СЭП во всех режимах работы в течение всего срока активного существования КА, который у современных геостационарных космических аппаратов с высоковольтными СЭП (100 В) должен быть не менее 15 лет. Поэтому разработка СЭП, обеспечивающих бортовую аппаратуру КА напряжением требуемого качества, имеет актуальное значение.

Целью работы является разработка и изготовление экспериментального образца ЭПА СЭП КА с распределенной архитектурой, а также исследование статических и динамических характеристик цифровой системы управления.

Описание архитектуры СЭП КА

Распределенная архитектура сохраняет принцип централизованного управления, т.е. осуществляет выработку управляющих воздействий на каждый объект управления на основе информации о состоянии всей совокупности объектов управления. В процессе функционирования каждый управляющий орган производит прием и обработку соответствующей информации, а также выдачу сигнала управления (СУ) на другие объекты. Для реализации функций управления каждый локальный орган вступает в процесс информационного взаимодействия с другими органами управления. Достоинством такой структуры является снижение требований к производительности и надежности каждого центра обработки и управления без ущерба для качества управления.

В состав экспериментального образца ЭПА СЭП КА (рис. 1) с распределенной цифровой системой управления [4–8], выходной мощностью 2,5 кВт входят:

1) четыре модуля стабилизации напряжения (МСН), предназначенные для:

– регулирования энергии бортовых арсенид-галлиевых СБ и стабилизации выходного напряжения (100 ± 1) В в составе замкнутой системы автоматического регулирования ЭПА при заряженных АБ во время функционирования КА на солнечном участке орбиты;

– стабилизации выходного напряжения (100 ± 1) В и заряда бортовых литий-ионных аккумуляторных батарей заданным стабилизированным током при превышении мощности СБ над мощностью нагрузки и требуемой мощностью заряда АБ;

– стабилизации выходного напряжения (100 ± 1) В и заряда АБ всей избыточной мощностью СБ при недостатке мощности СБ для обеспечения питания нагрузки и стабилизации тока заряда АБ на заданном уровне;

* Материал частично опубликован в сборнике докладов XVI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск: ТУСУР, 2020. – С. 188–190).

- разряда бортовых литий-ионных АБ и стабилизации напряжения (100 ± 1) В в составе замкнутой системы автоматического регулирования ЭПА во время функционирования КА на теневого участках орбиты или недостатке мощности СБ;
- ограничения максимального тока разряда АБ;

- 2) фильтр выходной шины (Ф100) питания нагрузки 100 В, предназначенный для фильтрации высокочастотных и уменьшения амплитуды низкочастотных отклонений выходного напряжения, вызванных коммутацией силовых транзисторов прибора и коммутацией нагрузки.

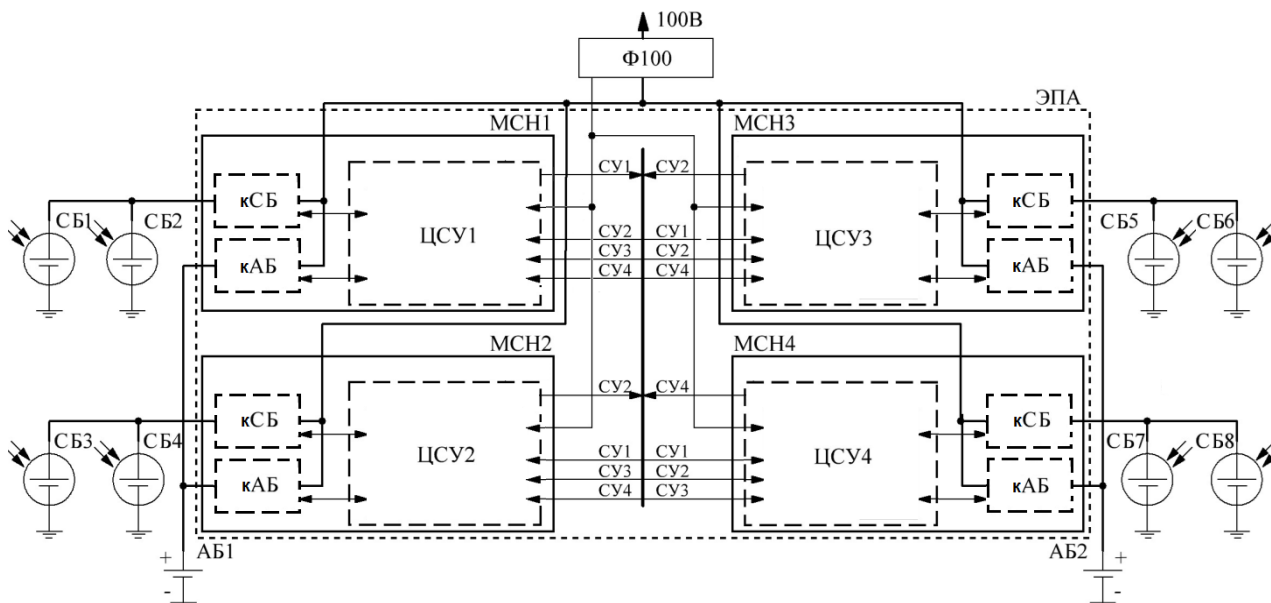


Рис. 1. Структурно-функциональная схема высоковольтной СЭП с выходной мощностью 2,5 кВт с распределенной цифровой системой управления ЭПА

Каждый МСН (объект управления) предназначен для работы с двумя секциями СБ и литий-ионной АБ с диапазоном разрядного напряжения от 96 до 55 В. Максимальное зарядное напряжение АБ 96,5 В.

При проектировании и создании СЭП используется дискретная секция СБ с током короткого замыкания 7,4 А в начале и 4,7 А в конце срока активного существования КА. Напряжение секции СБ в точке максимальной генерируемой мощности в начале срока активного существования не более 161 В, в конце – не менее 102,4 В.

МСН обеспечивает ограничение тока разряда АБ на уровне 16 А и выходного тока канала преобразования энергии АБ на уровне 12 А, а также заданное значение тока заряда АБ (2, 4, 6, 8 А).

МСН содержит следующие основные составные части:

- канал преобразования энергии АБ (кАБ);
- канал преобразования энергии СБ (кСБ);
- цифровую систему управления (ЦСУ).

Цифровая система управления выполняет следующие функции:

- обеспечение логики функционирования прибора при изменении соотношения мощностей нагрузки и первичных источников электрической энергии, а именно: равномерная загрузка регуляторов мощности СБ; равномерная загрузка разрядных устройств от АБ; выравнивание токов разряда АБ; включение режимов заряда АБ (2, 4, 6, 8 А);

- обеспечение заданных статических и динамических характеристик качества выходного напряжения ЭПА;
- сбор телеметрической информации о состоянии параметров ЭПА;
- выдача телеметрической информации в бортовой комплекс управления;
- прием команд управления от бортового комплекса управления.

Канал преобразования энергии АБ разработан и изготовлен на основе мостовой вольтодобавочной инверторно-трансформаторной схемы (рис. 2). Вольтодобавочный преобразователь [9] состоит из инвертора напряжения, выпрямителя и выходного LC-фильтра. Инвертор и выпрямитель образуют звено промежуточного высокочастотного преобразования части энергии источника, необходимой для формирования требуемого выходного напряжения, которое является суммой входного напряжения и добавленного регулируемого напряжения высокочастотного звена. Дополнительные транзистор и диод $V T_d$ и $V D_d$ служат для ограничения тока нагрузки в режиме перегрузки или короткого замыкания.

Регулирование напряжения преобразователя энергии АБ основано на фазовом сдвиге управляющих импульсов транзисторов регулируемой стойки инвертора относительно нерегулируемой. При избытке солнечной энергии вольтодобавочный преобразователь за счет реализации выпрямителя на активных ключах может работать в режиме инвертора тока, что позволяет реализовать заряд АБ. В этом

случае ток дросселя L меняет направление, а инвертор выполняет функцию выпрямителя [9].

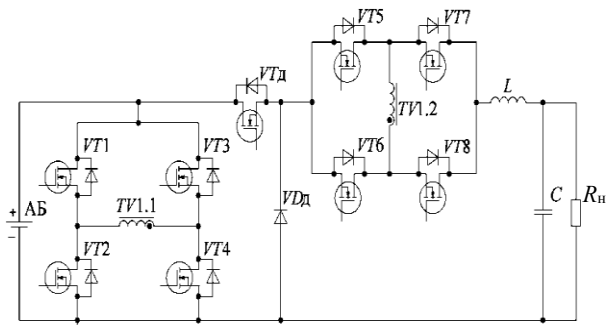


Рис. 2. Канал преобразования энергии АБ

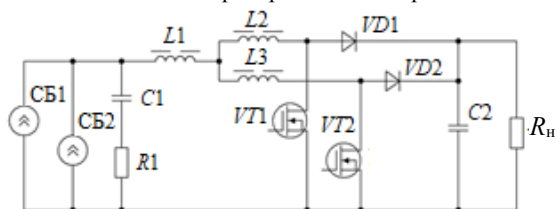


Рис. 3. Канал преобразования энергии СБ

Вольтодобавочный преобразователь изготовлен на транзисторах IRFP4868, трансформатор (с коэффициентом трансформации $K_{тр} = 1$) выполнен на магнитопроводе ELP 32/6/20 (феррит N87), дроссель L индуктивностью 25 мкГн изготовлен на магнитопроводе E32/6/20 с зазором $g = 0,5$ мм (феррит N87). Выходной фильтр C состоит из 2 конденсаторов B32524R3106K с общей емкостью 20 мкФ. Датчики тока и напряжения разработаны на основе AD215 с использованием усилителей AD8021ARZ AD.

Канал преобразования энергии СБ разработан и изготовлен на основе двухфазной схемы непосредственного преобразователя [10] напряжения повышающего типа (рис. 3) с коммутационными дросселями и содержит транзисторы $VT1$ и $VT2$ (IRFP4868), диоды $VD1$ и $VD2$ (VS-60CPQ150PBF), входной фильтр, имеющий более сложную структуру на элементах $C1$ (K73-17 250 В, 1 мкФ), $R1$ (0,125 Вт, 18 Ом), $L1$ с индуктивностью 82 мкГн, изготовленный на магнитопроводе E32/6/20 с зазором $g = 0,3$ мм (феррит N87), коммутационные дроссели $L2, L3$ с индуктивностью 1 мкГн, изготовленные на магнитопроводе EFD 20/10/7 с зазором $g = 0,3$ мм (феррит N87) и выходной фильтр $C2$ (B32524R3106K, 20 мкФ). Датчики тока и напряжения канала преобразования энергии СБ также разработаны на основе AD215 с использованием усилителей AD8021ARZ AD.

Цифровая система управления МСН разработана на основе аналогов современной электронной компонентной базы класса Sparce и состоит из четырех идентичных каналов. Каждый канал управляет своим МСН и включает в себя:

- микроконтроллер (STM32F407VGT6U);
- программируемую логическую интегральную схему (EP2C8Q208C8N);
- дифференциальные усилители (OP184);
- драйверы управления (ADUM3223XRZ).

Вычислительная мощность микроконтроллеров (STM32F407VGT6U) и программируемых логических интегральных схем (EP2C8Q208C8N) достаточна для формирования сигналов управления силовыми ключами двух каналов преобразования энергии и выдачи сигнальной информации о текущем состоянии функционирования МСН.

В зависимости от соотношения мощностей СБ и мощности, требуемой для электропитания КА, ЭПА высоковольтных СЭП автоматических КА должна обеспечивать работу в следующих режимах:

- «режим СН» – стабилизация выходного напряжения при помощи регулирования потока энергии от СБ через силовые преобразовательные каналы стабилизатора выходного напряжения СН;
- «режим ЗУ» – стабилизация выходного напряжения за счет регулирования потока энергии от выходной стабилизированной шины питания нагрузки через силовые преобразовательные каналы зарядного устройства;
- «режим РУ» – стабилизация выходного напряжения за счет регулирования потока энергии от АБ через силовые преобразовательные каналы разрядного устройства.

Экспериментальные исследования ЭПА СЭП КА с распределённой цифровой системой управления проводились при нормальных условиях в соответствии со схемой, представленной на рис. 4.

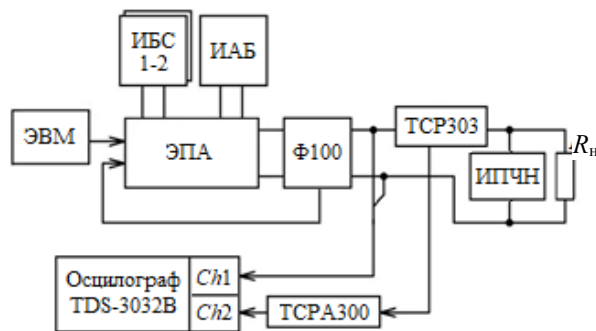


Рис. 4. Схема экспериментальных исследований ЭПА

На силовые входы ЭПА были подключены один имитатор АБ (ИАБ) и два имитатора СБ (ИБС). На выход ЭПА была подключена постоянная нагрузка (R_n), параллельно которой подключен имитатор переменной частоторегулируемой нагрузки ИПЧН-100 (ИПЧН) для имитации сбора/наброса тока нагрузки.

В качестве источника питания собственных нужд ЭПА использовался лабораторный источник питания. Измерение выходного тока и напряжения производилось осциллографом TDS-3032B и токовой приставкой ТСПА300 совместно с токовым щупом ТСП303.

Охлаждение ЭПА во время испытаний осуществлялось за счет блока радиаторов [11] с принудительным воздушным охлаждением (рис. 5).

Экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Интеллектуальная силовая электроника и системы управления» ТУСУРа.

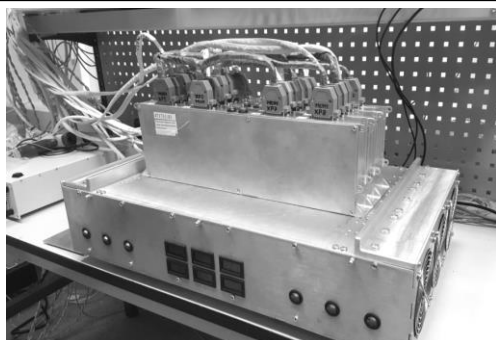


Рис. 5. Экспериментальный образец ЭПА с охлаждающей установкой

Исследование пульсации выходного напряжения ЭПА при работе на активную нагрузку

Результаты исследований и оценка пульсаций выходного напряжения ЭПА произведены при параметрах, представленных в табл. 1. При этом емкость фильтра выходной шины питания нагрузки составляет 2000 мкФ.

Таблица 1

Параметры измерения пульсаций и результаты экспериментальных исследований выходного напряжения ЭПА при работе на активную нагрузку

Характеристика	Значение					
	РУ		СН		ЗУ	
Режим работы ЭПА	РУ		СН		ЗУ	
Напряжение холостого хода имитатора СБ, В	110					
Ток короткого замыкания имитатора СБ, А	-		4,7*8		1,5*8	
Напряжение имитатора АБ, В	85	55	85	55	85	55
Сопротивление «ИПЧН-100», Ом	11,11					
Амплитуда пульсаций выходного напряжения, В	0,104	0,164	0,097	0,097	0,940	0,216
	0,204					

На рис. 6 представлены результаты эксперимента в режиме РУ при напряжении АБ – 85 В.

Из анализа результатов эксперимента следует, что пульсации выходного напряжения ЭПА при работе на активную нагрузку не превышают 1 В, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современной ЭПА высоковольтных СЭП КА (100±1) В.

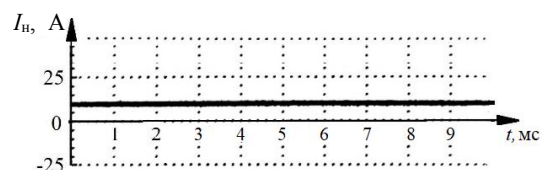
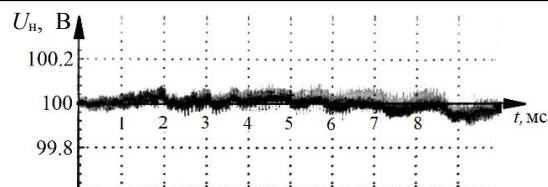


Рис. 6. Экспериментальные осциллограммы пульсаций выходного напряжения ЭПА при работе на активную нагрузку: U_n, I_n – напряжение и ток нагрузки

На рис. 7 представлены результаты эксперимента в режиме РУ при напряжении АБ – 85 В.

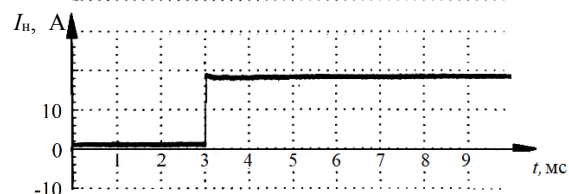
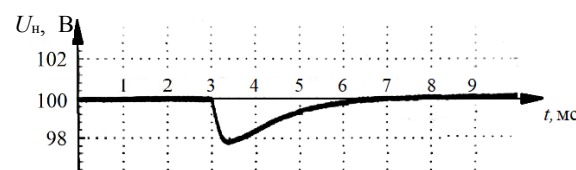


Рис. 7. Осциллограммы переходных процессов выходного напряжения ЭПА при пульсации тока нагрузки:

U_n, I_n – напряжение и ток нагрузки

Результаты исследований и оценка переходных процессов выходного напряжения ЭПА произведены при параметрах, представленных в табл. 2.

Исследование переходных процессов выходного напряжения ЭПА при пульсациях тока нагрузки без изменения режима работы ЭПА

Из анализа результатов эксперимента следует, что длительность переходных процессов изменения выходного напряжения не превышает 4 мс, а максимальное напряжение переходного процесса 2,8 В, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным ЭПА высоковольтных СЭП КА (длительность переходного процесса – не более 5 мс, амплитуда – не более 3 В).

Таблица 2

Параметры измерения переходных процессов и результаты экспериментальных исследований выходного напряжения ЭПА при пульсациях тока нагрузки без изменения режима работы ЭПА

Характеристика	Значение						
	РУ			СН		ЗУ	
Режим работы ЭПА	РУ			СН		ЗУ	
Напряжение холостого хода имитатора СБ, В	110						
Ток короткого замыкания имитатора СБ, А	-			4,7*8	7*8	4,7*8	2,16*8
Напряжение имитатора АБ, В	85	55	96	96		85	90
Сопротивление постоянной нагрузки, Ом	71						16,66
Сопротивление «ИПЧН-100», Ом	5,55						8,33
Величина сброса/наброса тока нагрузки, А	18						12
Амплитуда пульсаций выходного напряжения, В	2,28	2,38	2,24	2,8	2,38	2,8	1,52
Длительность переходного процесса, мс	3,0	3,7	3,1	4,0	2,1	2,5	2,0

Таблица 3

Параметры измерения переходных процессов и результаты экспериментальных исследований выходного напряжения ЭПА при изменении режимов его работы

Характеристика	Значение							
	СН ↓ РУ	РУ ↓ СН	ЗУ ↓ РУ	РУ ↓ ЗУ	ЗУ ↓ СН	СН ↓ ЗУ	ЗУ ↓ РУ	РУ ↓ ЗУ
Напряжение холостого хода имитатора СБ, В	110							-
Ток короткого замыкания имитатора СБ, А	2,5*8				3,5*8		1,5*8	
Напряжение имитатора АБ, В	90		85					
Сопrotивление постоянной нагрузки, Ом	16,66							
Сопrotивление «ИПЧН-100», Ом	5,55							
Величина сброса/наброса тока нагрузки, А	18							
Время спада/нарастания тока нагрузки, мкс	8							
Амплитуда пульсаций выходного напряжения, В	4,28	3,8	4	3,64	3,24	3,2	2,6	2,56
Длительность переходного процесса, мс	2,1	7	3,5	7	5	3	3	3

Исследование переходных процессов выходного напряжения ЭПА при изменении режимов её работы

Результаты исследований и оценка переходных процессов выходного напряжения ЭПА произведены при параметрах, представленных в табл. 3.

На рис. 8 представлены результаты эксперимента при переходе из режима СН в режим РУ.

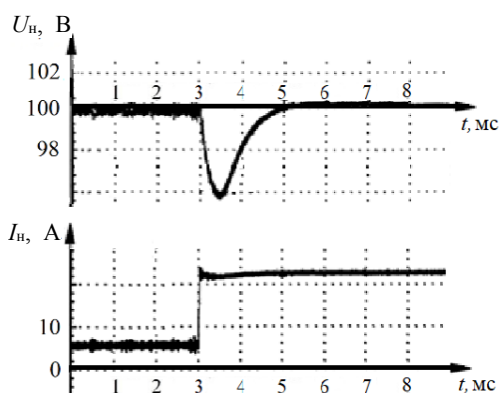


Рис. 8. Осциллограммы переходных процессов выходного напряжения ЭПА при изменении режимов его работы: U_n, I_n – напряжение и ток нагрузки

Результаты экспериментальных исследований показывают, что величина максимального напряжения переходного процесса не превышает значение 4,28 В, а длительность переходного процесса – 7 мс. Полученные результаты соответствуют требованиям, предъявляемым к современной ЭПА высоковольтных СЭП КА.

Заключение

Разработана энергопреобразующая аппаратура высоковольтной системы электропитания автоматического космического аппарата выходной мощностью 2,5 кВт с распределённой цифровой системой управления, имеющая следующие характеристики:

- пульсации выходного напряжения ЭПА при работе на активную нагрузку не превышает 1 В;
- величина максимального напряжения переходного процесса, без смены режима работы ЭПА, не превышает значение 4,28 В, а длительность переходного процесса – 7 мс;

– длительность переходных процессов изменения выходного напряжения, при смене режима работы ЭПА, не превышает 4 мс, максимальное напряжение переходного процесса – 2,8 В.

Полученные результаты соответствуют требованиям, предъявляемым к современной ЭПА высоковольтных СЭП КА.

Статья подготовлена в рамках выполнения работы FEWM-2020-0046 «Фундаментальные основы и методология создания высокоэффективного энергопреобразования для систем космического и морского назначения на базе интеллектуальных силовых модулей сверхвысокой степени интеграции».

Литература

1. Шиняков Ю.А. Выбор структуры систем электропитания низкоорбитальных космических аппаратов / Ю.А. Шиняков, А.С. Гуртов, К.Г. Гордеев, С.В. Ивков // Вестник Самар. гос. аэрокосмического ун-та. – 2010. – № 1(21). – С. 103–113.
2. Цифровая система управления энергопреобразующей аппаратурой высоковольтных систем электропитания космических аппаратов / М.П. Сухоруков, Д.С. Торгаева, А.Г. Юдинцев, В.М. Рулевский // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. – 2020. – № 1-1. – С. 188–190.
3. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Исляев. – Новосибирск: ВО «Наука»; Сибирская изд. фирма, 1994. – 318 с
4. Методика синтеза цифрового регулятора для канала преобразования энергии солнечной батареи в системе электропитания космического аппарата / В.Н. Школьный, В.Д. Семенов, В.А. Кабиров, М.П. Сухоруков, Д.С. Торгаева // Сибирский журнал науки и технологий. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 74–86. – DOI: 10.31772/2587-6066-2019-20-1-74-86.
5. Имитационное моделирование систем электропитания автоматических космических аппаратов большой мощности / Д.С. Торгаева, М.П. Сухоруков, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев // 19-я Междунар. конф. «Авиация и космонавтика»: тезисы 19-й Междунар. конф., Москва, 23–27 ноября 2020 г. – М.: Перо, 2020. – С. 496–497.
6. The method of synthesis of the digital controller for a solar energy conversion channel of the solar battery in the power supply system of a spacecraft / V.N. Shkolnyi, V.D. Semenov, V.A. Kabirov et al. // Siberian Journal of Science and

Technology. – 2019. – Vol. 20, No. 1. – P. 74–86. – DOI: 10.31772/2587-6066-2019-20-1-74-86.

7. Methodology to synthesis of digital regulator for solar battery energy conversion channel in the spacecraft power supply system / Yu.A. Shinyakov, V.D. Semenov, V.A. Kabirov, D.S. Torgaeva, M.P. Sukhorukov. R.S. Sevastyanov // Problems of Complex Systems Optimization: Proceedings of the 13th International Asian School-Seminar within the framework of the international multi-conference IEEE SIBIRCON. – Novosibirsk, 2017. – P. 346–350.

8. Пат. 2665252 РФ, МПК G06F 15/16. Резервированная четырёхканальная цифровая управляющая система / В.Н. Школьный (РФ), М.П. Сухоруков (РФ), Ю.А. Шиняков (РФ), А.А. Лопатан (РФ), Д.С. Тораева (РФ), Р.С. Севасьянов (РФ). – № 2017128052: заявл. 04.08.2017: опубл. 28.08.2018, Бюл. № 25.

9. Двухнаправленный вольтодобавочный преобразователь с активным выпрямителем для заряда-разряда аккумулятора в системах электропитания / А.В. Осипов, И.С. Шемолин, В.Н. Школьный, Р.А. Латыпов // Доклады ТУСУР. – 2018. – № 1 (21). – С. 119–126.

10. Запольский С.А. Анализ способов обеспечения мягкого переключения транзисторов повышающего преобразователя в системах электропитания космических аппаратов / С.А. Запольский, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 116–119. – DOI 10.21293/1818-0442-2017-20-2-116-119.

11. Патент на полезную модель №187987 U1 РФ, МПК G12B 15/04, H05K 7/20, H01L 23/34, H01L 23/36. Охлаждающая установка для силовых модулей энергопреобразующего комплекса при проведении испытаний / М.П. Сухоруков, Ю.А. Шиняков, О.А. Теушчаков, А.И. Отто. – № 2018132288: заявл. 10.09.2018: опубл. 26.03.2019, Бюл. № 9.

Сухоруков Максим Петрович

Директор Центра коллективного пользования «Интеллектуальная силовая электроника и системы управления» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), зав. лаб. цифровых систем управления НИИ космических технологий ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-882-26-98
Эл. почта: max_sukhorukov@mail.ru

Sukhorukov M.P.

Energy-converting equipment of high-voltage spacecraft power supply systems with a digital control system

The article presents the results of experimental studies of the experimental and known characteristics of the energy-converting equipment (EPA) of the supply system (EPS) of a spacecraft (SC) with a digital control system. The obtained results of experimental studies confirm the theoretical results obtained earlier in the development of a digital control system for the ESA of the EPS of the spacecraft.

Keywords: energy-converting equipment, power supply system, digital control system, spacecraft.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-123-128

References

1. Shinyakov Yu.A., Gurtov A.S., Ivkov S.V. [The choice of the structure of power supply systems for low-orbit space-

craft]. *Vestnik of Samara State Aerospace University*, 2010, no. 1(21), pp. 103–113 (in Russ.).

2. Sukhorukov M.P., Torgaeva D.S., Yudin A.G., Rulevskiy V.M. [Digital control system for energy-converting equipment of high-voltage power supply systems of spacecraft]. *Electronic Means and Control Systems. Proceedings of the International Scientific-Practical Conference*. 2020, no. 1-1, pp. 188–190 (in Russ.).

3. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev Sh.N. [Power supply systems for spacecraft]. «Nauka»; Siberian publishing company, 1994, 318 p. (in Russ.).

4. Shkolny V.N., Semenov V.D., Kabirov V.A., Sukhorukov M.P., Torgaeva D.S. [Method of synthesizing a digital controller for the energy conversion channel of a solar battery in the spacecraft power supply system]. *Siberian journal of science and technology*, 2019, no. 20, pp. 74–86 (in Russ.).

5. Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P., Rulevskiy V.M., Yudin A.G. [Simulation modeling of power supply systems for automatic high-power spacecraft] *19th International Conference «Aviation and Cosmonautics»: Abstracts of the 19th International Conference, Moscow, November 23–27, 2020*, pp. 496–497 (in Russ.).

6. Shkolnyi V.N., Semenov V.D., Kabirov V.A., Sukhorukov M.P., Torgaeva D.S. [The method of synthesis of the digital controller for a solar energy conversion channel of the solar battery in the power supply system of a spacecraft]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, no. 1, pp. 74–86.

7. Shinyakov Yu., Semenov V., Kabirov V. [Methodology to synthesis of digital regulator for solar battery energy conversion channel in the spacecraft power supply system]. *Problems of Complex Systems Optimization: Proceedings of the 13th International Asian School-Seminar within the framework of the international multi-conference IEEE SIBIRCON*. – Novosibirsk, 2017, pp. 346–350.

8. Shkolny V.N., Sukhorukov M.P., Shinyakov Yu.A., Lopatan A.A., Torgaeva D.S., Sevastyanov R.S. [Redundant four-channel digital control system]. Patent RF, no. 2665252, 2018 (in Russ.).

9. Osipov A.V., Shemolin I.S., Shkolny V.N., Latypov R.A. [Bidirectional booster converter with an active rectifier for battery charge-discharge in power supply system's]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, no. 1 (21), pp. 119–126 (in Russ.).

10. Zapolsky S.A., Shkolny V.N., Shinyakov Yu.A. [Analysis of ways to ensure soft switching of boost converter transistors in spacecraft power supply system's]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, no. 2, pp. 116–119 (in Russ.).

11. Sukhorukov M.P., Teushchakov O.A., Shinyakov Yu.A., Otto A.I. *Cooling unit for power modules of the energy-converting complex during testing*. Patent RF, no. 187987, 2019 (in Russ.).

Maxim P. Sukhorukov

Director, Shared Use Center «Intelligent Power Electronics and Control Systems»,
Head, Laboratory of Digital Control Systems,
Research Institute of Space Technologies,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., 205/2, Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-882-26-98
Email: max_sukhorukov@mail.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 – также, как и в тексте. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте (... на рис. 3, ... в табл. 2).

10. Рисунки и фотографии должны быть **черно-белыми**, четкими, контрастными, аккуратными, сгруппированными. Графики – не жирно, сетка – четко. Единицы измерения – на русском. Десятичная запятая (не точка). Рисунки могут быть выполнены в программах CorelDraw, Illustrator, Word, Visio и должны давать возможность внесения исправлений.

11. Иллюстрации, должны быть разрешением не менее 600 dpi. Масштаб изображения – 8 или 16,7 см по ширине (при условии читаемости всех надписей, выполненных шрифтом Times New Roman, после масштабирования – 9 кегль).

12. На все источники, указанные в списке литературы, должны быть ссылки по тексту (нумерация в порядке упоминания, например, [1, 2], [5–7]). Описание источников должно соответствовать ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008 и содержать всю необходимую для идентификации источника информацию, а именно: для *непериодических изданий* – фамилию и инициалы автора, полное название работы, место издания, название издательства, год издания, количество страниц; для *периодических изданий* – фамилию, инициалы автора, полное название работы, название журнала, год выпуска, том, номер, номера страниц (см. примеры оформления библиографий).

Бумажный вариант рукописи статьи должен быть подписан авторами и (для сторонних авторов) иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Материальные претензии авторов, связанные с распространением материалов их статей после опубликования, не принимаются.

Авторы несут полную ответственность за содержание статей и за последствия, связанные с их публикацией.

Контактная информация

Адрес: 634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Эл. почта: vnmas@tusur.ru. Тел.: +7 (382-2) 51-21-21

