

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Доклады ТУСУР. 2019 • Том 22, № 2

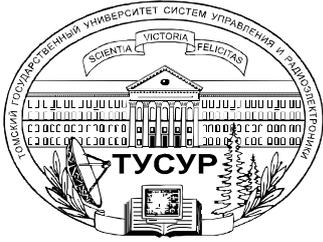
ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

2019 • Том 22, № 2



9 771818 044708 02007



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
2019, том 22, № 2**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

А.А. Шелупанов, д.т.н., проф., ректор, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы 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> (гл. редактор).

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

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

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

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

Ян Браун (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., зав. 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

А.Р. Сафин, к.т.н., доц., НИУ «МЭИ», Москва, Россия.
П.Е. Троян, д.т.н., проф., директор департамента образования, ТУСУР, почетный работник высшего профессионального образования РФ, почетный работник науки и техники РФ, Томск, Россия.

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

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

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

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

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

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 25.06.2019.

Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 12. Тираж 500. Заказ 14.

Editorial board

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

Содержание

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Александрин А.М., Саломатов Ю.П. Влияние наличия оправы на характеристики линзовых антенн из неоднородного диэлектрика.....	7
Крюков Я.В., Покаместов Д.А., Рогожников Е.В., Громова Ю.С. Моделирование канала связи СО-NOMA.....	12
Тренкаль Е.И., Малютин Н.Д., Лоцилов А.Г., Федоров В.Н. Расчетно-экспериментальный метод анализа волн в нерегулярных связанных полосковых линиях с сосредоточенными неоднородностями.....	17
Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Новый способ трёхкратного резервирования межсоединений.....	26
Хажибеков Р.Р. Исследование амплитудно-частотных характеристик модальных фильтров с пассивным проводником в виде последовательности отрезков линий передачи.....	31
Шевченко Г.М., Семенов Э.В. Уменьшение погрешности измерения времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов при использовании осциллографов с узкой полосой пропускания.....	37

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Басыня Е.А., Хиценко В.Е., Рудковский А.А. Метод идентификации киберпреступников, использующих инструменты сетевого анализа информационных систем с применением технологий анонимизации.....	45
Козачок А.В., Копылов С.А. Подход к маркированию текстовых электронных документов и его сравнение с существующими аналогами.....	52
Баночкин П.И., Лунёва Е.Е., Ефремов А.А. Оценка профилей пользователей-экспертов социальной сети.....	61
Катаев М.Ю., Бутин С.М. сравнительный анализ методов повышения пространственного разрешения спутниковых данных LANDSAT-8.....	67
Ширяев Б.В., Ющенко А.Ю., Безрук А.В. Алгоритм автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем с использованием искусственных нейронных сетей.....	72
Цавнин А.В., Ефимов С.В., Замятин С.В. Корневой подход к синтезу параметров ПИД-регулятора, гарантирующий отсутствие перерегулирования в переходной характеристике системы управления.....	77
Осинцев А.В., Комнатнов М.Е. Объектно-ориентированный анализ алгоритма управления и проектирование архитектуры программного обеспечения для климатической экранированной ТЕМ-камеры.....	83
Сергеев В.Л., Донг Ван Хоанг, Хагай Д.Э. Модели и алгоритмы адаптивного метода диагностики фильтрационных потоков в процессе испытаний горизонтальных скважин.....	90
Ехлаков Ю.П., Пермякова Н.В. Нечеткая когнитивная модель поддержки принятия решений на этапе мониторинга и управления рисками программных проектов.....	96
Алимханова А.Н., Мицель А.А. Оценка эффективности предприятий на основе метода DEA.....	104
Катаев М.Ю., Рудова Е.В. Методика учета угла направления движения человека при изучении параметров походки по видеопоследовательности.....	109
Несмелова Н.Н. Прогностическая модель адаптации человека к информационной нагрузке.....	114

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Рулевский В.М. Методика определения оптимального напряжения и частоты переменного тока в трехфазном кабель-тресе системы электропитания подводного аппарата.....	121
Рулевский В.М. Техническая реализация и алгоритмическое обеспечение системы электропитания удаленного потребителя электроэнергии.....	128
Требования	135

ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Aleksandrin A.M., Salomatov Y.P. Effect of the rim presence on the characteristics of inhomogeneous dielectric lens antennas	7
Kryukov Ya.V., Pokamestov D.A., Rogozhnikov E.V., Gromova Yu. S. Simulation of CO-NOMA communication channel	12
Trenkal E.I., Malyutin N.D., Loschilov A.G., Fedorov V.N. Computational experimental method of analyzing waves in irregular coupled strip lines with lumped inhomogeneities	17
Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R. New method for triple reservation of interconnects	26
Khazhibekov R.R. Study of the amplitude-frequency characteristics of modal filters with a passive conductor in the form of a series of transmission line segments	31
Shevchenko G.M., Semyonov E.V. Reducing the measurement error of the time of the return recovery of rapidly recovering diodes using oscilloscopes with a narrow bandwidth	37

CONTROL, COMPUTER SCIENCE, AND INFORMATICS

Basinya E.A., Khitsenko V.E., Rudkovskiy A.A. Method to identify cybercriminals using network analysis of information systems with anonymization	45
Kozachok A.V., Kopylov S.A. The approach to text electronic documents marking and its comparison with existing analogues	52
Banokin P.I., Luneva E.E., Yefremov A.A. Classification of Twitter social network expert users	61
Kataev M.Yu., Butin S.M. Comparative analysis of the methods of increasing the spatial resolution of satellite data LANDSAT-8	67
Shiryaev B.V., Yushchenko A.Yu., Bezruk A.V. Algorithm for automated visual inspection of monolithic integrated circuits using neural networks	72
Tsavnin A.V., Efimov S.V., Zamyatin S.V. PID-controller tuning approach guaranteeing non-overshooting step response	77
Osintsev A.V., Komnatnov M.E. Object-oriented analysis and design of the algorithm and architecture control software of environmental shielded TEM-chamber	83
Sergeev V.L., Dong V.H., Khagay D.E. Models and algorithms of adaptive method to detect filtration flow during horizontal well testing	95
Ehlakov Yu.P., Permyakova N.V. Fuzzy cognitive model of decision support at the stage of monitoring and risk management of software projects	96
Alimkhanova A.N., Mitsel A.A. Evaluation of enterprise performance based on the DEA method	104
Kataev M.Yu., Rudova E.V. Calculating the angle of human movement direction by studying the parameters of a gait using video sequences ...	109
Nesmelova N.N. Prognostic model of human adaptation to the information load	114

ELECTRICAL ENGINEERING

Rulevskiy V.M. Method to determine the optimal voltage and AC frequency in a three-phase cable-rope of the underwater power supply system	121
Rulevskiy V.M. Technical implementation and algorithmic support of power supply system for remote power consumer	128
Manuscript requirements	135

**ЭЛЕКТРОНИКА,
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

УДК 621.396.677.85

А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов

Влияние наличия оправы на характеристики линзовых антенн из неоднородного диэлектрика

Рассмотрено влияние наличия оправы на характеристики линзовых антенн из неоднородного диэлектрика. Оправа представляет собой полый цилиндр, охватывающий боковую поверхность линзы. Установлено, что оправка влияет на КИП линзовой антенны, причём данное влияние имеет характер периодической зависимости КИП от ширины оправы (разность между внутренним и внешним радиусами цилиндра). Установлены значения ширины оправы, при которых КИП сохраняет значение, равное КИП линзы без оправы. Обнаружено, что данные значения не зависят от радиуса и диэлектрической проницаемости линзы, а зависят только от диэлектрической проницаемости материала оправы, причём данная зависимость имеет гиперболический вид.

Ключевые слова: линзовая антенна, неоднородный диэлектрик.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-7-11

Цилиндрическая линза Микаэляна

Линзы из неоднородного диэлектрика находят применение в различных системах передачи данных [1–7]. Авторами были предложены конструкции линз для применения в составе антенных решёток (АР) в качестве дополнительного фокусирующего элемента, позволяющего увеличить период АР и расширить полосу рабочих частот [8–10]. В качестве линзы в данных АР применяется линза Микаэляна (ЛМ) [11, 12], которая изготавливается из искусственного неоднородного диэлектрика [13–15]. Линза Микаэляна представляет собой цилиндр, в котором диэлектрическая проницаемость меняется вдоль радиуса по закону [9]

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_0 / \operatorname{ch} \left(\frac{r}{r_0} \operatorname{Arch} \sqrt{\varepsilon_0} \right),$$

где ε_0 – значение диэлектрической проницаемости на оси линзы, r_0 – радиус линзы. Облучатель ЛМ примыкает к торцу цилиндра в его центре.

При использовании ЛМ в качестве самостоятельной линзовой антенны, а также при применении в составе линейных антенных решёток её необходимо изготавливать совместно с оправой. Оправа представляет собой полый цилиндр, охватывающий боковую поверхность линзы. При изготовлении ЛМ в соответствии с методом, предложенным в [9], где линза набирается из элементарных слоёв в форме «цветка», оправка выполняет несущую функцию, удерживая «лепестки» каждого слоя за их концы (рис. 1). Кроме того, на оправке можно разместить элементы крепления линзы к несущим частям антенной системы (рис. 2).

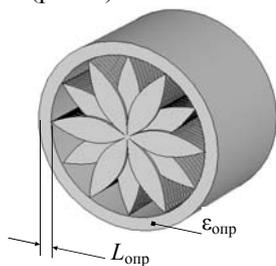


Рис. 1. Линза с цилиндрической оправой

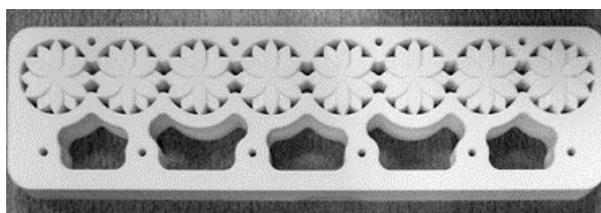


Рис. 2. Линзы в составе линейной АР, снабжённые общей оправой, на которой имеются элементы для крепежа

Влияние ширины оправы на КИП линзы

При экспериментальных исследованиях АР, изображённой на рис. 2, был обнаружен следующий эффект: когда линза снабжена оправой, её КИП существенно зависит от ширины оправы $L_{\text{опр}}$. На рис. 3 представлена расчётная зависимость коэффициента использования площади (КИП) линзы радиусом 2λ от ширины оправы, выраженной в длинах волн в диэлектрике $\lambda_{\text{эопр}}$. Диэлектрическая проницаемость оправы в данном случае была равна её значению в центре линзы ε_0 .

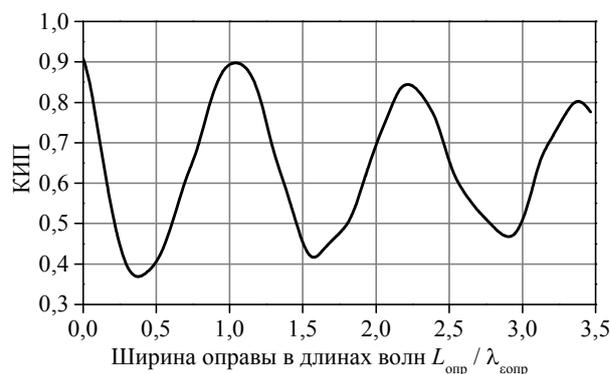


Рис. 3. Зависимость апертурного КИП линзы радиуса 2λ от ширины оправы, выраженной в длинах волн в диэлектрике

Как можно видеть, данная зависимость носит приблизительно периодический характер. Исходный КИП, равный 0,9, при увеличении $L_{\text{опр}}$ снижается до 0,4, после чего возрастает до практически исходного уровня.

Очевидно, что при реализации линзы с оправой ширина оправы должна соответствовать второму максимуму данной зависимости. На рис. 3 ему соответствует значение $L_{\text{опр}} \approx \lambda_{\text{эопр}}$.

На рис. 4 приведены результаты численного моделирования линз различных радиусов с оправой различной ширины.

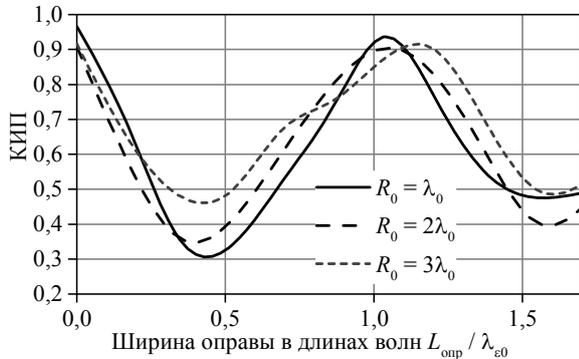


Рис. 4. Зависимости апертурного КИП линз различных радиусов R_0 от ширины оправы, выраженной в длинах волн в диэлектрике

Как можно видеть, положение второго максимума на данных графиках практически не зависит от радиуса линзы.

Влияние материалов линзы и оправы на КИП

Для выявления того, какие параметры материалов линзы и оправы влияют на характеристики, приведённые на рис. 3, 4, проводилось моделирование ЛМ с различными значениями ϵ_0 , снабжённой оправой с различными значениями $\epsilon_{\text{опр}}$. На рис. 5 представлены зависимости КИП от $L_{\text{опр}}$, рассчитанные для разных ϵ_0 и $\epsilon_{\text{опр}} = 3$. Радиус линзы равен 3λ .

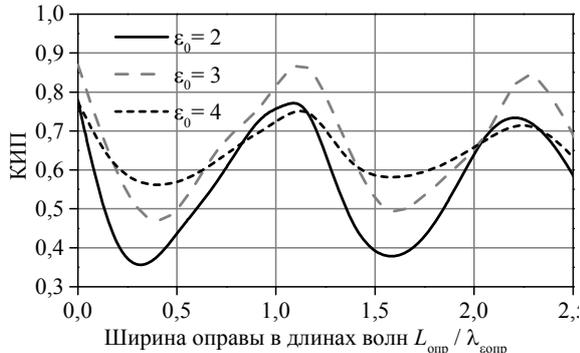


Рис. 5. Зависимости апертурного КИП линзы от ширины оправы, рассчитанные для разных значений диэлектрической проницаемости в центре линзы

Из графиков можно видеть, что положение второго максимума не зависит от ϵ_0 .

Зависимость положения второго максимума КИП от $\epsilon_{\text{опр}}$ приведена на рис. 6. Для каждого значения $\epsilon_{\text{опр}}$ положение максимума КИП вычислялось усреднением по данным расчётов для различных радиусов линзы (см. рис. 4). Сплошной линией на графике изображена аппроксимирующая кривая, описываемая выражением

$$L_{\text{опр}} / \lambda_{\text{эопр}} (\epsilon_{\text{опр}}) \approx \frac{0,268}{\epsilon_{\text{опр}} - 0,917} + 0,952.$$

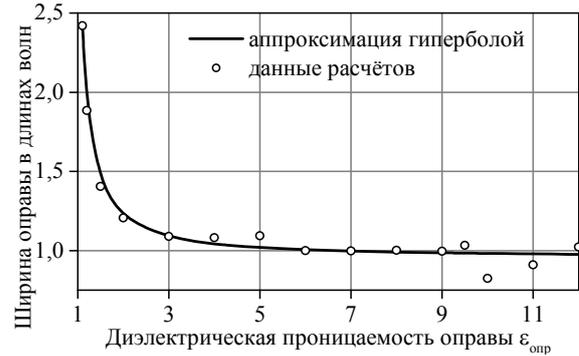


Рис. 6. Зависимость усреднённой электрической толщины оправы для второго максимума КИП от значения диэлектрической проницаемости оправы ($\epsilon_{\text{опр}}$)

Влияние на КИП оправы, частично охватывающей линзу

С целью определения области оправы, наиболее критично влияющей на КИП, было проведено моделирование линзы с оправой, которая имеет толщину $t_{\text{опр}}$, меньшую толщины линзы $t_{\text{л}}$. При этом возможны два случая примыкания оправы к линзе: 1) оправка расположена «сзади» так, чтобы её задний край находился в одной плоскости с задним торцом линзы (рис. 7, слева); 2) оправка расположена «спереди» линзы, так, чтобы её передний край совпадал с передним краем линзы (рис. 7, справа).

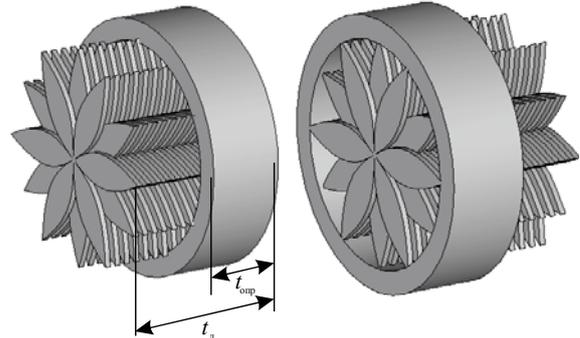


Рис. 7. Оправка с толщиной, меньшей толщины линзы, и варианты её ориентации относительно линзы

В ходе расчётов менялась относительная толщина оправы $t_{\text{опр}}/t_{\text{л}}$ с сохранением её ориентации относительно линзы («спереди» или «сзади»). Ширина оправы соответствовала худшему значению КИП, который она обеспечивала при полной толщине $-0,5\lambda_{\text{опр}}$. Зависимость КИП от $t_{\text{опр}}/t_{\text{л}}$ для двух случаев приведена на рис. 8.

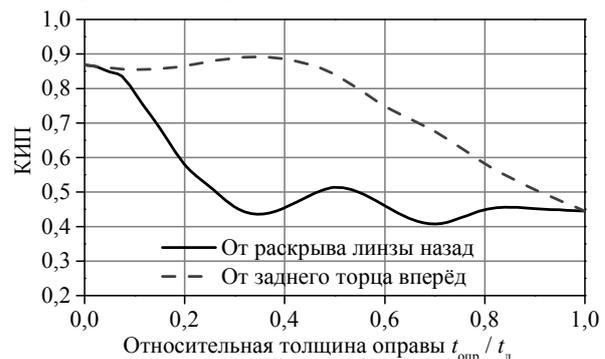


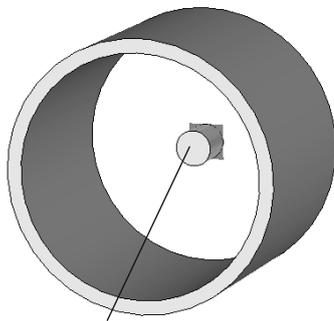
Рис. 8. Зависимость КИП от относительной толщины оправы

Из рис. 8 видно, что оправы, расположенная «сзади», не оказывает существенного влияния на КИП вплоть до относительной толщины 0,4, а при её дальнейшем утолщении КИП линейно падает. Если оправы расположена «спереди», то при увеличении её относительной толщины КИП быстро падает до минимальных значений.

Моделирование оправы без линзы

Такое поведение КИП можно объяснить, предположив наличие в линзе с оправой парциальных волноводных мод, возникающих в отрезке диэлектрического волновода, которым является оправы. При этом от толщины стенок волновода будет зависеть степень канализации волны таким волноводом.

Для проверки данного предположения было проведено моделирование только оправы с облучателем без линзы (рис. 9).



Волноводный облучатель

Рис. 9. Оправы с волноводным облучателем без линзы

На графике коэффициента направленного действия (КНД) в направлении оси (рис. 10) также имеется периодичность с приблизительно тем же периодом, как и у зависимости КИП линзы от ширины оправы (рис. 3), что служит подтверждением объяснения ухудшения КИП с линзой наличием парциальной волноводной моды в оправы.

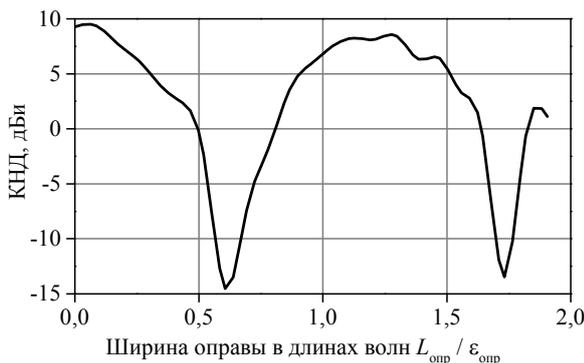


Рис. 10. КНД облучателя с оправой в направлении оси

Аналогичная зависимость проявляется на графике неравномерности амплитудного распределения $\sigma_{ампл}$ (рис. 11). Данная величина представляет собой среднеквадратическое отклонение амплитудного распределения линзы с оправой от амплитудного распределения линзы без оправы. Минимумы данной величины примерно соответствуют минимумам КНД на рис. 3.

Неравномерность фазового распределения $\sigma_{фаз}$ не имеет периодичности (рис. 12).

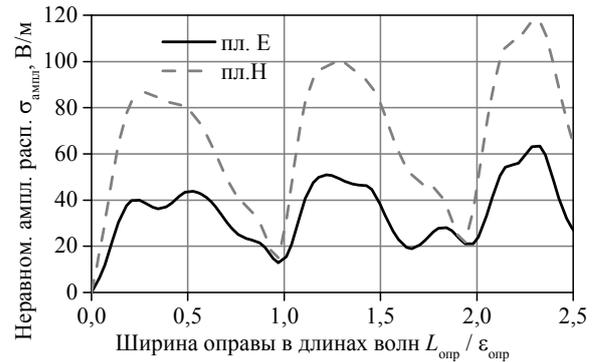


Рис. 11. Неравномерность амплитудного распределения в раскрыве линзы с оправой

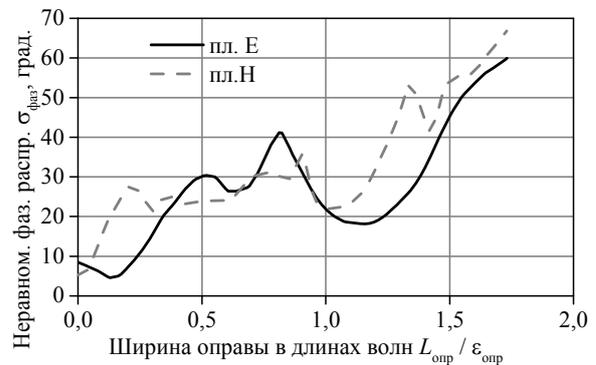


Рис. 12. Неравномерность фазового распределения в раскрыве линзы с оправой

Диапазонные свойства линзы с оправой

Наличие зависимости КИП от ширины оправы оказывает влияние на частотные свойства линзовой антенны. В качестве параметра, описывающего эти свойства, выступает уменьшение КНД – разность между КНД линзы без оправы и КНД линзы с оправой. Частотная зависимость данной величины приведена на рис. 13. График был рассчитан для линзы радиусом 3λ с оправой шириной λ , обеспечивающей максимум КИП на центральной частоте f_0 . Если определить полосу частот по допустимому уменьшению КНД в 0,5 дБ, то коэффициент перекрытия составит 1,5, а при допустимом уменьшении КНД в 1 дБ – 1,65.



Рис. 13. Уменьшение КНД, вызванное наличием оправы, в полосе частот

Заключение

В статье рассмотрено влияние оправы на характеристики линзы из неоднородного диэлектрика. Установлено, что оправка существенно влияет на КИП, причём КИП периодически зависит от ширины оправы. Эффект объясняется наличием парциальных волноводных мод в оправе, что было подтверждено моделированием оправы с облучателем без линзы, в результате которого получилась аналогичная периодическая зависимость. При практической реализации линзы с оправкой необходимо выбирать ширину оправы такой, чтобы обеспечить максимальный КИП. Зависимость ширины оправы, удовлетворяющей данному условию, от материала оправы носит приближенно гиперболический характер и для широко используемых полистирола или полиэтилентерефталата составляет примерно 1,2 длины волны в материале.

Наличие эффекта подтверждается экспериментально при исследованиях линейной АР, включающей в себя линзы в общей оправе.

Линза с оправкой может работать в полосе частот с коэффициентом перекрытия примерно 1,5 при максимальном ухудшении КНД на 0,5 дБ.

Литература

1. Многолучевая широкополосная антенная система на основе линзы Люнеберга / Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов, М.И. Сугак, Н.А. Павлов, М.Е. Синицин // *Нелинейный мир*. – 2014. – № 5. – С. 37–44.
2. Антенная система с круговой поляризацией на основе плоскостройной сферической линзы Люнеберга / Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов, А.М. Александрин, С.А. Дранишников // 24-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). – Севастополь, 2014. – 465 с.
3. Ryazantsev R.O. Concave Spherical Feed Array for Luneberg Lens / R.O. Ryazantsev, Y.P. Salomatov, M.I. Sugak // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Proceedings*. – 2013, Russia, Krasnoyarsk, September 12–13. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693605
4. Ryazantsev R.O. Flat-layered spherical lens antenna system in conditions of slant polarized feeder radiation / R.O. Ryazantsev, Y.P. Salomatov, V.S. Panko, M.I. Sugak // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Proceedings*, Russia, Krasnoyarsk. 12–4 May 2016. – Красноярск, 2016. – DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491863
5. Kwon D.-H. Beam Scanning Using Flat Transformation Electromagnetic Focusing Lenses / D.-H. Kwon, D.H. Werner // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2009. – Vol. 8. – DOI: 10.1109/LAWP.2009.2033619
6. Lu B.Q. Transformation-optics Antenna Lens Design Using Complex Coordinate Transformation / B.Q. Lu, Z.H. Jiang, D.H. Werner // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. – 2014. – Vol. 1. DOI: 10.1109/APS.2014.6904361
7. Aghanejad I. High-Gain Planar Lens Antennas Based on Transformation Optics and Substrate-Integrated Waveguide (SIW) Technology / I. Aghanejad, H. Abiri, A. Yahaghi // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2016. – Vol. 68. – July. – P. 45–55. DOI: 10.2528/PIERC16070807
8. Александрин А.М. Плоская гибридная антенная решётка проходного типа / А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов // *Труды 67-й науч.-техн. конф., посвященной Дню радио*. – 12–27 апреля 2012 г. – СПб.: Санкт-Петербургская организация «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова» (СПб НТОРЭС), 2012. – С. 14–15.
9. Александрин А.М. Широкополосная антенная решётка с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика / А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов // *Доклады ТУСУР*. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 7–10.
10. Александрин А.М. Построение плоских апертурных антенн с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика / А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов // *Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнёва*. – 2012. – Вып. 6 (46). – С. 8–10.
11. Микаэлян А.Л. Применение слоистой среды для фокусировки волн // *Доклады Академии наук СССР*. – 1951. – Т. 81. – 569 с.
12. Зелкин Е.Г. Линзовые антенны / Е.Г. Зелкин, Р.А. Петрова. – М.: Советское радио, 1974. – 259 с.
13. Alexandrin A.M. Implementation of a Radially Inhomogeneous Medium and Construction of the Aperture Antennas on its Basis // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings*. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, Russia, September 12–13, 2013. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693593
14. Реализация радиально-неоднородного диэлектрика и создание апертурных антенн на его основе / А.М. Александрин, Е.Р. Гафаров, К.В. Лемберг, В.С. Панько, С.В. Поленга, Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6 [Электронный ресурс]. – URL: www.science-education.ru/113-10789
15. Aleksandrin A.M. Numerical optimization of the discrete Mikaelian lens / A.M. Aleksandrin, R.O. Ryazantsev, Y.P. Salomatov // *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016. Proceedings*. – 14 June 2016. – DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491859

Александрин Антон Михайлович

Ст. преп. каф. радиотехники
Сибирского Федерального университета (СФУ)
Свободный пр-т., д. 79, г. Красноярск, Россия 660041
Тел.: +7-965-897-67-92
Эл. почта: aalexandrin@sfu-kras.ru

Саломатов Юрий Петрович

Зав. каф. радиотехники СФУ
Свободный пр-т., д. 79, г. Красноярск, Россия 660041
Тел.: +7 (391-2) 91-22-78
Эл. почта: ysalamatov@sfu-kras.ru

Aleksandrin A.M., Salomatov Y.P.

Effect of the rim presence on the characteristics of inhomogeneous dielectric lens antennas

The article considers the effect of the presence of a dielectric rim on the characteristics of inhomogeneous dielectric lens antennas. The rim is a hollow cylinder covering the side surface of the lens. It was shown that the rim influences the aperture efficiency of the lens antenna, which comes out in a peri-

odic dependence of the aperture efficiency on the width of the rim (the difference between the inner and outer radii of the cylinder). The values of the widths of the rim are obtained at which the aperture efficiency keeps the value equal to aperture efficiency of the lens without the rim. It was found that these values do not depend on the radius or the permittivity of the lens, but depend only on the permittivity of the rim material, and this relationship has a hyperbolic character.

Keywords: lens antennas, inhomogeneous dielectric.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-7-11

References

1. Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P., Sugak M.I., Pavlov N.A. Sinitsin M.E. Multibeam wideband antenna system based on the Luneburg lens. *Nelineyniy Mir*, 2014, No. 5, pp. 37–44 (in Russ.)
2. Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P., Aleksandrin A.M., Dranishnikov A.S. Circularly polarized antenna system based on flat-layered spherical Luneburg lens. *24th International Crimean Conference «Microwave engineering and telecommunications» (CriMiCo 2014)*, Sevastopol, 2014, p. 465 (in Russ.)
3. Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P., Sugak M.I. Concave Spherical Feed Array for Luneberg Lens. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Proceedings*, Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693605
4. Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P., Panko V.S., Sugak M.I., Flat-layered spherical lens antenna system in conditions of slant polarized feeder radiation, *2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Proceedings*, Russia, Krasnoyarsk, 12–4 May 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491863
5. Kwon D.-H., Werner D.H. Beam Scanning Using Flat Transformation Electromagnetic Focusing Lenses, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, vol. 8. DOI: 10.1109/LAWP.2009.2033619
6. Lu B.Q., Jiang Z.H., Werner D.H. Transformation-optics Antenna Lens Design Using Complex Coordinate Transformation. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2014, vol. 1. DOI: 10.1109/APS.2014.6904361
7. Aghanejad I., Abiri H., Yahaghi A. High-Gain Planar Lens Antennas Based on Transformation Optics and Substrate-Integrated Waveguide (SIW) Technology. *Progress In Electromagnetics Research*, 2016, vol. 68, no. July, pp. 45–55. DOI: 10.2528/PIERC16070807
8. Aleksandrin A.M., Salomatov Y.P. Flat hybrid transmitarray. *Proceedings of 67th Conference dedicated to the Radio day*, 12–27 April, 2012, pp. 14–15 (in Russ.)
9. Aleksandrin A.M., Salomatov Y.P., Wideband antenna array using artificial inhomogeneous dielectric structures. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 2 (26), part 1, pp. 7–10 (in Russ.)
10. Aleksandrin A.M., Salomatov Y.P. Constructing flat aperture antennas using artificial inhomogeneous dielectric structures. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2012, issue 6 (46), pp. 8–10 (in Russ.)
11. Mikaelian A.L. Application of layered media for wave focusing. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1951, vol. 8, p. 569 (in Russ.)
12. Zelkin E.G., Petrova R.A. *Linzovye anteny*. Moscow, Sovetskoye Radio, 1974, 259 p. (in Russ.)
13. Aleksandrin A.M. Implementation of a Radially Inhomogeneous Medium and Construction of the Aperture Antennas on its Basis // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, September 12–13, 2013. – DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693593
14. Aleksandrin A.M., Gafarov E.R., Lemberg K.V., Panko V.S., Polenga S.V., Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P. Radially Inhomogeneous Medium and Aperture Antennas on its Basis. *Modern problems of science and education*, 2013, No. 6, URL: www.science-education.ru/113-10789 (in Russ.)
15. Aleksandrin A.M., Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P. Numerical optimization of the discrete Mikaelian lens. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 Proceedings*, 14 June 2016, DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491859.

Anton M. Aleksandrin

Senior Lecturer
Radio Engineering Department,
Siberian Federal University
79 Svobodny st. Krasnoyarsk, Russia, 660041
Phone: +7-965-897-67-92
Email: aalexandrin@sfu-kras.ru

Yury P. Salomatov

Head of Radio Engineering Department
Siberian Federal University
79 Svobodny st. Krasnoyarsk, Russia, 660041
Phone: +7 (391-2) 91-22-78
Email: ysalomatov@sfu-kras.ru

УДК 621.396.41

Я.В. Крюков, Д.А. Покаместов, Е.В. Рогожников, Ю.С. Громова

Моделирование канала связи CO-NOMA

Системы мобильной связи пятого поколения 5G в 2019 г. находятся на заключительной стадии разработки и стандартизации. Одной из наиболее важных проблем для разработчиков является повышение спектральной эффективности, которая решается в том числе с помощью применения новых методов множественного доступа. На начальном этапе разработки 5G исследовательскими группами предложено применение методов неортогонального множественного доступа, а одним из наиболее перспективных из них является метод неортогонального множественного доступа с разделением каналов по мощности (NOMA). В работе рассматривается модификация данного метода – применение дополнительной ретрансляции сигналов между абонентами (CO-NOMA). Показано, что уплотнение каналов методом CO-NOMA способствует увеличению спектральной эффективности системы в определенных условиях канала передачи. Произведено математическое моделирование множественного канала связи двух абонентов для двух сценариев распределения ресурса связи между ними. Приведено сравнение помехоустойчивости и информационной эффективности систем OFDMA, NOMA и CO-NOMA в простом канале передачи с аддитивным белым гауссовым шумом и затуханием сигнала в свободном пространстве.

Ключевые слова: OFDMA, NOMA, CO-NOMA, 5G, множественный доступ, ретрансляция.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-12-16

В 2012 г. группой разработчиков был предложен метод неортогонального множественного доступа с разделением каналов по мощности. В настоящее время эта технология постоянно совершенствуется, а в 2016 г. было предложено использовать дополнительную ретрансляцию сигналов для увеличения спектральной эффективности системы связи.

Применение ретрансляции сигналов между приемно-передающими устройствами предложено довольно давно и в настоящее время применяется в некоторых системах связи (например, Ad-hoc). Способ организации канала связи по цепочке эффективно используется в радиорелейных линиях, а также сенсорных, специальных, самоорганизующихся сетях или сетях без единого узлового центра (базовой станции) и т.д. В настоящее время ретрансляционный способ организации сети активно используется для организации связи внутри самоорганизующейся группы (роя) беспилотных летательных аппаратов (или дронов).

Однако применение ретрансляции сигналов в системах связи беспроводного широкополосного доступа (например, LTE), которые работают по технологии OFDMA и основаны на централизованном управлении доступом абонентов к связи, не является эффективным из-за дополнительных затрат ресурса связи на дополнительный канал. Это приводит к уменьшению спектральной эффективности и усложнению процедуры контроля и управления пользовательскими каналами. В связи с этим в современных сотовых системах связи ретрансляция сигналов не используется.

В настоящее время ведущими инженерами-исследователями в области беспроводной связи ведется разработка алгоритмов и технологий для стандарта связи следующего, пятого, поколения. Стремление увеличить спектральную и энергетическую эффективность, а также гибкость будущих систем беспроводной связи привело к возникновению идеи

применения ретрансляции сигналов на базе метода множественного доступа с разделением каналов по мощности NOMA, который был предложен в [1–8], наряду с методом множественного доступа с помощью разреженных кодов [9, 10]. Ретрансляция сигналов на базе группы методов NOMA впервые опубликована в работах [11] в 2015–2016 гг. В зарубежных источниках данная технология называется Cooperative-NOMA (CO-NOMA).

Технология CO-NOMA предложена совсем недавно и представляет интерес для моделирования и экспериментального исследования. В работе описаны общие принципы организации канала связи CO-NOMA, а также производится оценка его эффективности по сравнению с каналами связи OFDMA и NOMA.

Распределение ресурса связи в OFDMA

В нынешних системах связи беспроводного широкополосного доступа для организации многоканальной связи используется метод множественного доступа OFDMA, который имеет множество преимуществ, однако является недостаточно гибким с точки зрения распределения энергетического ресурса связи между абонентами. В спецификации LTE предусмотрена регулировка мощности каждого служебного и пользовательского физического канала. Однако часто возникает ситуация, когда для удовлетворения качества связи абонента не требуется использование всей доступной мощности, и в таком случае мощность его канала будет снижена. Недостаток OFDMA заключается в том, что неиспользованный ресурс мощности невозможно применить для увеличения качества связи другого абонента (рис. 1). На рис. 1 количество выделенного под каждый канал ресурса связи представлено в виде объемной фигуры с гранями P (мощность), T (время) и F (полоса частот). Объем фигуры показывает общее количество ресурса связи, затрачиваемое на организацию связи.

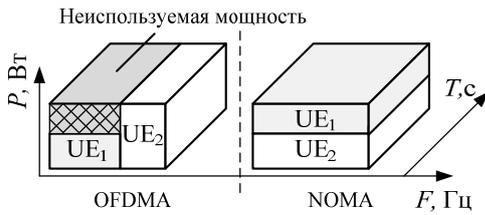


Рис. 1. Пример распределения ресурса связи между двумя абонентами

Для свободного мощностного ресурса может использоваться группа методов NOMA, согласно которым частотно-временной и энергетический ресурс распределяются одновременно между абонентами для максимального удовлетворения качества связи каждого из них, исходя из информации о состоянии их каналов передачи. Применение метода NOMA предоставляет возможность задействовать всю доступную мощность передачи, перераспределяя ее между абонентами.

Метод CO-NOMA

Метод CO-NOMA заключается в дополнительной ретрансляции сигнала от одного абонента к другому при условии, что канал связи между абонентами является благоприятным. Процедура ретрансляции при этом может осуществляться в дополнительный частотно-временной ресурс, например временной слот. Применение ретрансляции на базе NOMA наиболее эффективно (в отличие от OFDMA) потому, что групповой сигнал NOMA уже содержит в себе сигналы всех абонентов, поэтому не требуется выделение дополнительного ресурса для передачи ретранслируемого.

Распределение ресурса связи в CO-NOMA представлено на рис. 2. В течение первого временного слота сигнал, сформированный по технологии NOMA, передается от узловой станции к абонентам UE₁ и UE₂. В течение второго временного слота сигнал ретранслируется от UE₁ к UE₂.

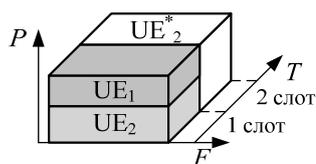


Рис. 2. Пример распределения ресурса связи между двумя абонентами в CO-NOMA

На стороне абонента UE₂ (см. рис. 2) происходит гибкая демодуляция двух принятых сигналов – сигнала от узловой станции, принятого в первый временной слот, и ретранслированного сигнала от другого абонента, принятого во второй временной слот. Таким образом, отношение сигнал/шум на входе демодулятора сообщения UE₂ повышается и достигается улучшение качества связи.

Технология CO-NOMA может эффективно использоваться в системах связи широкополосного беспроводного доступа в следующих случаях: 1) абоненту с низким значением ОСШ требуется обеспечить дополнительное качество связи, при

этом имеется свободный частотно-временной и энергетический ресурс; 2) на трассе между узловой станцией и одним из абонентов присутствуют компоненты, вносящие существенное ослабление и помехи в сигнал (например, толстая стена), а трасса между абонентами имеет благоприятные условия для распространения сигнала (рис. 3).

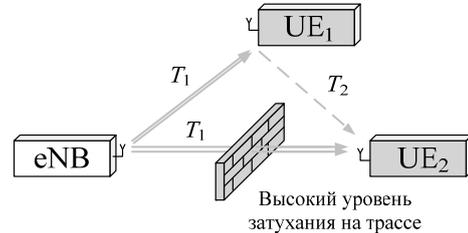


Рис. 3. Ретрансляция сигнала в CO-NOMA

Организацию нисходящего канала связи CO-NOMA для двух абонентов можно представить в виде следующего алгоритма:

1. На стороне узловой станции происходит формирование общего транспортного сигнала для двух абонентов, после чего сигнал излучается в радиозэфир во временной слот T_1 (см. рис. 3).
2. На стороне первого абонента UE₁ осуществляется демодуляция и компенсация сигнала второго абонента UE₂ с последующей демодуляцией собственного сигнала (алгоритм SIC демодуляции). При этом регенерированный сигнал второго абонента хранится в памяти до момента ретрансляции.
3. В течение второго временного слота T_2 происходит передача сигнала второго абонента от первого абонента к второму абоненту (см. рис. 3 – пунктирная линия). При этом процедура ретрансляции должна быть точно синхронизирована с системным временем и полностью завершена за время второго временного слота.
4. После приема ретранслирующего сигнала на стороне второго абонента происходит гибкая демодуляция двух принятых сигналов. На этапе демодуляции могут применяться различные алгоритмы принятия решений при условии, что происходит когерентная обработка и установлена точная синхронизация.

Моделирование канала связи CO-NOMA

Целью моделирования является сравнение характеристик помехоустойчивости каналов передачи OFDMA, NOMA и CO-NOMA при одинаковых скоростях передачи и условиях распространения сигнала. Структурная схема организации канала связи CO-NOMA представлена на рис. 4.

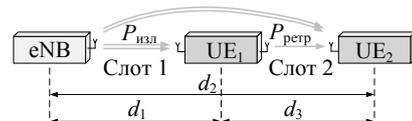


Рис. 4. Структурная схема канала связи CO-NOMA

В CO-NOMA для передачи информации отводится два одинаковых временных слота длительностью 0,5 с каждый. Первый слот – передача дан-

ных от eNB к UE_{1,2}; второй слот – ретрансляция сигнала от UE₁ к UE₂. В OFDMA и NOMA весь информационный пакет передается за один слот длительностью 1 с.

Абоненты UE₁ и UE₂ располагаются друг за другом в одинаковом направлении на расстоянии d_1 и d_2 от узловой станции eNB, при этом абонент UE₁ находится ближе к eNB, т.е. $d_1 < d_2$. На сигнал воздействует нормальная помеха, спектральная плотность мощности которой $N_0 = -100$ дБВт/Гц и ослабление (для несущей частоты 6 ГГц), которое в первом приближении зависит только от расстояния между приемником и передатчиком.

Мощность излучения транспортного сигнала $P_{\text{изл}}$ на стороне узловой станции изменяется в диапазоне от 0 до 100 дБм. В сотовых системах связи мощность излучения абонентской станции меньше, чем узловой станции, поэтому прием мощность ретрансляционного сигнала $P_{\text{ретр}}$ на порядок меньше, чем $P_{\text{изл}}$. Длительности первого и второго слотов равны. Отношение сигнал/шум измеряется для сигнала мощностью $P_{\text{изл}}$ на стороне каждого абонента. Общее количество переданных бит за время T в полосе частот F одинаковое для OFDMA, NOMA и CO-NOMA.

В общем случае возможно бесконечное количество различных конфигураций каналов связи, поэтому, чтобы оценить эффективность CO-NOMA, были выбраны такие конфигурации (сценарии), при которых использование CO-NOMA оказывается выгоднее, чем OFDMA и NOMA, с точки зрения максимальной спектральной эффективности.

Зависимости BER (SNR), полученные в результате моделирования, представлены на рис. 5.

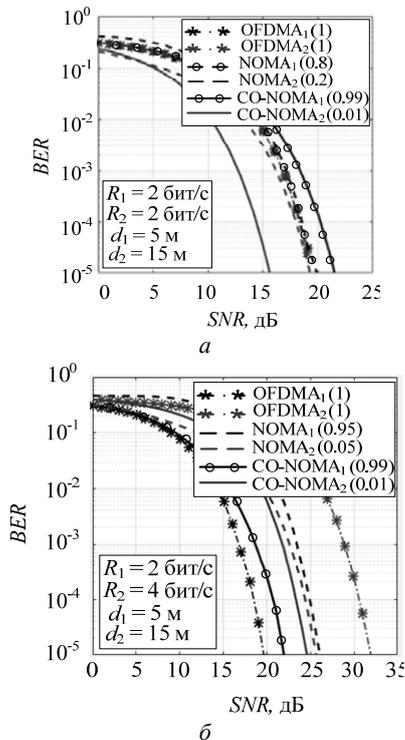


Рис. 5. Зависимость BER (SNR) для двух каналов OFDMA, NOMA, CO-NOMA: а – сценарий 1; б – сценарий 2

В скобках указаны парциальные мощности каждого канала, а в левом нижнем углу приведены расстояния и скорости передачи каждого абонента. Значения помехоустойчивости измерены при опорном значении вероятности битовой ошибки 10^{-5} . Под помехоустойчивостью понимается значение отношения сигнал/шум (SNR), при котором достигается заданная скорость передачи с заданной вероятностью битовой ошибки.

Из зависимостей, представленных на рис. 5, б, видно, что помехоустойчивость первого канала CO-NOMA меньше на 2 дБ, чем в канале OFDMA, но больше на 3 дБ, чем в канале NOMA. Помехоустойчивость второго канала CO-NOMA на 1 и 7,5 дБ больше, чем в канале NOMA и OFDMA. Соответственно, как и в первом случае, система CO-NOMA имеет выигрыш энергетической эффективности.

Расчет и сравнение информационной эффективности систем

Обобщенной характеристикой эффективности систем связи является коэффициент использования канала по пропускной способности – информационная эффективность [12–15]:

$$\eta_k = \frac{\gamma_k}{\log(\gamma_k/\beta_k + 1)}$$

Для оценки эффективности систем связи можно применять коэффициент использования канала по мощности (энергетическая эффективность)

$$\beta_k = \frac{R_k}{SNR_k}$$

и коэффициент использования канала по полосе частот (спектральная эффективность)

$$\gamma_k = \frac{R_k}{F_k}$$

Тогда информационную эффективность системы Q можно представить в виде суммы информационных эффективностей каждого канала. В таблице приведены рассчитанные значения Q для каждого метода мультиплексирования каналов. Информационная эффективность CO-NOMA в 1,52 раза больше, чем в NOMA, и в 1,53 раза больше, чем в OFDMA.

Информационная эффективность системы

Метод	OFDMA	NOMA	CO-NOMA
Q	$4,49e^{-2}$	$4,52e^{-2}$	$6,90e^{-2}$

Выводы

В работе рассмотрено применение и произведено моделирование ретрансляции сигналов на основе метода множественного доступа с разделением каналов по мощности NOMA. Результат моделирования показал, что метод CO-NOMA может быть эффективно применен в реальных условиях (в описанных ранее случаях) наравне с методами OFDMA и NOMA.

По результатам моделирования рассчитана информационная эффективность многоканальных систем связи, основанных по технологиям OFDMA, NOMA и CO-NOMA. Результат расчета показал, что

система CO-NOMA имеет наибольшую информационную эффективность при выбранных сценариях моделирования.

Получено, что системы CO-NOMA могут обладать большей информационной эффективностью, чем системы NOMA. Рассчитанное значение информационной эффективности на основании результатов моделирования системы CO-NOMA в 1,52 раза больше, чем в NOMA.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований молодых российских ученых. Грант МК-1126.2019.9.

Литература

- Marcus M.J. 5G and «IMT for 2020 and beyond» [Spectrum Policy and Regulatory Issues] // *IEEE Wireless Communications*. – 2015. – Vol. 22, No. 4. – P. 2–3.
- Soldani D. Horizon 2020 and beyond: on the 5G operating system for a true digital society / D. Soldani, A. Manzalini // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. – 2015. – Vol. 10, No. 1. – P. 32–42.
- Benjebbour A. Non-orthogonal multiple access (NOMA): Concept, performance evaluation and experimental trials // *Wireless Networks and Mobile Communications, 2015 International Conference on, IEEE*. – 2015. – P. 1–6.
- Kimy B. Non-orthogonal multiple access in a down-link multiuser beamforming system // *MILCOM 2013–2013 IEEE Military Communications Conference, IEEE*. – 2013. – P. 1278–1283.
- Dai L. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends // *IEEE Communications Magazine*. – 2015. – Vol. 53, No. 9. – P. 74–81.
- Ding Z. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems / Z. Ding, M. Peng, H. Poor // *IEEE Communications Letters*. – 2015. – Vol. 19, No. 8. – P. 1462–1465.
- Крюков Я.В. Алгоритм расчета мощности каналов при неортогональном множественном доступе NOMA / Я.В. Крюков, А.Я. Демидов, Д.А. Покаместов // *Доклады ТУСУР*. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 91–94.
- Крюков Я.В. Метод множественного доступа с разделением каналов по мощности на ортогональных несущих // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. – 2018. – Т. 12, № 1. – С. 17–22.
- Формирование и обработка сигналов множественного доступа с разреженным кодом / Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков, Е.В. Рогожников, Р.Р. Абенов // *Электросвязь*. – 2016. – № 10. – С. 73–78.
- Покаместов Д.А. Влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов / Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков // *Доклады ТУСУР*. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 65–69.
- Ding Z. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems // *IEEE Communications Letters*. – 2015. – Vol. 19, No. 8. – P. 1462–1465.
- Радиотехнические системы передачи информации / В.А. Борисов, В.В. Калмыков, Я.М. Ковальчук. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
- Теория передачи сигналов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.

14. Теория электрической связи: учеб. для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.

15. Панфилов И.П. Теория электрической связи / И.П. Панфилов, В.Е. Дырда. – М.: Радио и связь, 1991. – 344 с.

Крюков Яков Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Вершинина ул., д. 47, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7-913-104-44-06
Эл. почта: kryukov.tusur@gmail.com

Покаместов Дмитрий Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТОР ТУСУР Вершинина ул., д. 47, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7-952-809-43-75
Эл. почта: dmaltomsk@mail.ru

Рогожников Евгений Васильевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТОР ТУСУР Вершинина ул., д. 47, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7-923-441-40-95
Эл. почта: udzhon@mail.ru

Громова Юлия Сергеевна

Инженер департамента сверхвысокочастотной электроники (ДСВЧЭ) АО НПФ «Микран» Вершинина ул., д. 47, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7-923-426-15-17
Эл. почта: Dzhulia.gromova@yandex.ru

Kryukov Ya.V., Pokamestov D.A., Rogozhnikov E.V., Gromova Yu. S.

Simulation of CO-NOMA communication channel

The fifth generation mobile communication systems are in the final stages of development and standardization in 2019. One of the most important problems for developers – increasing of spectral efficiency, which is decided through the use of new methods of multiple access. At the initial stage of development of 5G, research groups proposed the use of non-orthogonal multiple access methods, and one of the most important of them is the non-orthogonal multiple access method with power channel multiplexing (NOMA). In the paper a modification of NOMA – using of an additional signal relay (CO-NOMA) is considered. It is shown that channel compression of the CO-NOMA methods contributes to an increase in the spectral efficiency of the system under certain conditions of the transmission channel. A mathematical simulation of the multiple communication channel of two users for two scenarios of the distribution of communication resources is carried out. A comparison of noise immunity and information efficiency of OFDMA, NOMA and CO-NOMA systems is given.
Keywords: OFDMA, NOMA, CO-NOMA, 5G, multiple access, signal retranslation.
doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-12-16

References

- Marcus M.J. 5G and «IMT for 2020 and beyond». *IEEE Wireless Communications*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 2–3.

2. Soldani D., Manzalini A. Horizon 2020 and beyond: on the 5G operating system for a true digital. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 32–42.
3. Benjebbour A. Non-orthogonal multiple access (NOMA): Concept, performance evaluation and experimental trials. *Wireless Networks and Mobile Communications*, 2015 International Conference on, IEEE, 2015, pp. 1–6.
4. Kimy B. Non-orthogonal multiple access in a downlink multiuser beamforming system. *MILCOM 2013*, 2013 IEEE Military Communications Conference, IEEE, 2013, pp. 1278–1283.
5. Dai L. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends. *IEEE Communications Magazine*, 2015, vol. 53, no. 9, pp. 74–81.
6. Ding Z., Peng M., Poor H. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems. *IEEE Communications Letters*, 2015, vol. 19, no. 8, pp. 1462–1465.
7. Kryukov Ya.V., Demidov A.Ya., Pokamestov D.A. Algorithm of power calculation of channel with non-orthogonal multiple access NOMA. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 4, pp 91–94 (in Russ.)
8. Kryukov Ya.V. Method of multiple access with channel separation by power on orthogonal carries. *T-Comm: Telecommunication and Transport*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 17–22 (in Russ.)
9. Pokamestov D.A., Demidov A.Ya., Kryukov Ya.V., Rogozhnikov E.V., Abenov R.R. Generation and processing of multiple access signals with sparse code. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2016, no.10, pp. 73–78 (in Russ.)
10. Pokamestov D.A., Demidov A.Ya., Kryukov Ya.V., The influence of forming matrices on the noise immunity of communication channels with multiple access on the basis of sparse codes. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 65–69 (in Russ.)
11. Ding Z. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems. *IEEE Communications Letters*, 2015, vol. 19, no. 8, pp. 1462–1465.
12. Borisov V.A., Kalmikov V.V., Kovalchuk Ya.M. Radiotekhnicheskie sistemi peredachi informatsii [Radio information transmission systems]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1990. 304 p.
13. Zuko A.G., Klovsikii D.D., Nazarov M.V., Fink L.M. Teoria peredachi signalov [Theory of transmission signals]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1986. 304 p.
14. Zuko A.G., Klovsikii D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V. Teoria elektrichiskoi svyazi. Uchebnik dlya vuzov [Theory of electrical communication. Textbook for high schools]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1999. 432 p.
15. Panfilov I.P., Dirda V.E. Teoria elektrichiskoi svyazi [Theory of electrical communication]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1991. 344 p.

Yakov V. Kryukov

Candidate of Engineering, Assistant Professor,
Department of Telecommunications and Basic Principles
of Radio Engineering, Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics
47, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045
Phone: +7-913-104-44-06
Email: kryukov.tusur@gmail.com

Dmidriy A. Pokamestov

Candidate of Engineering, Assistant Professor,
Department of Telecommunications and Basic Principles
of Radio Engineering, Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics
47, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045
Phone: +7-952-809-43-75
Email: dmaltomsk@mail.ru

Evgeniy V. Rogozhnikov

Candidate of Engineering, Assistant Professor,
Department of Telecommunications and Basic Principles
of Radio Engineering, Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics
47, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045
Phone: +7-923-441-40-95
Email: udzhon@mail.ru

Yulia S. Gromova

Engineer, Department of Microwave Electronics, Micran
47, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045
Phone: +7-923-426-15-17
Email: Dzhulia.gromova@yandex.ru

УДК 621.372

Е.И. Тренкаль, Н.Д. Малютин, А.Г. Лоцилов, В.Н. Федоров

Расчетно-экспериментальный метод анализа волн в нерегулярных связанных полосковых линиях с сосредоточенными неоднородностями

Рассмотрено численное решение задачи анализа волновых процессов в нерегулярных связанных полосковых линиях на основе конечно-разностной формы телеграфных уравнений. Рассмотрено два способа задания граничных условий – расчет напряжений и токов в начале и на конце полосковой структуры, используя матричный анализ; определение напряжений и токов в процессе измерений с помощью векторных анализаторов. Матричный анализ ступенчато-нерегулярных полосковых линий проводится при задании первичных параметров в виде полигонов. Введение полигонов первичных параметров позволило устранить проблему определения производных от функций напряжений и токов в точках включения сосредоточенных неоднородностей. Приведен пример расчета волн напряжений и токов в двухканальном трансформаторе импедансов. Представлено сравнение расчетных и экспериментальных результатов исследования устройства на основе ступенчато-нерегулярных связанных полосковых линий, подтвердивших применимость предложенного расчетно-экспериментального метода.

Ключевые слова: нерегулярные связанные полосковые линии, трансформатор импедансов, конечно-разностные телеграфные уравнения, полигоны первичных параметров.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-17-25

Нерегулярные линии передачи используются для построения трансформаторов импеданса, применяемых в усилительных каскадах на основе транзисторов и микросхем [1–3], согласования антенн [4] и других устройств. Нерегулярность линий передачи позволяет получить расширение полосы рабочих частот согласующих цепей, направленных ответвителей, частотно-селективных фильтров. Наряду с этим нерегулярность параметров полосковых линий передачи может возникать вследствие технологических неточностей, а также при использовании отрезков полосковых линий в качестве датчиков при помещении их в слоистую среду с целью определения состава и параметров отдельных слоев [5, 6].

Анализ волн в связанных полосковых линиях (СПЛ) основывается на решении телеграфных уравнений [7, 8], в результате чего получают матрицы передачи, связывающие напряжения и токи на входе с напряжениями и токами на выходе СПЛ.

Произвольное изменение погонных параметров связанных полосковых линий вдоль направления распространения квази-Т-волн не позволяет получить точное решение телеграфных уравнений. В этом случае переходят к конечно-разностной форме телеграфных уравнений и численному их решению [9, 10] в частотной и/или временной областях [11–14].

Цель настоящей работы – рассмотреть моделирование волновых процессов в связанных ступенчато-нерегулярных полосковых линиях в частотной области путем перехода от классических телеграфных уравнений к их конечно-разностной форме и численного решения записанной системы уравнений. Рассматривается два способа задания граничных условий при численном решении задачи анализа волн в рассматриваемой структуре: аналитический в результате вычисления матрицы передачи и нахождения напряжений и токов в начале и на конце структуры; экспериментальный, состоящий в опре-

делении напряжений и токов путем измерений с помощью векторного анализатора цепей с последующим вычислением параметров волн напряжений и токов.

Эквивалентная схема полосковой структуры. Конечно-разностная форма системы телеграфных уравнений

Эквивалентная схема исследуемой ступенчато-нерегулярной полосковой структуры показана на рис. 1. На рисунке обозначены: W_1, W_2, W_3 – отрезки связанных полосковых линий соответственно длиной l_1, l_2, l_3 ; Z_{r1}, \dots, Z_{r4} – сопротивления сосредоточенных неоднородностей; Z_{n1}, \dots, Z_{n4} – нагрузки на входе и выходе полосковой структуры; E_1, E_2 – ЭДС источника сигнала, возбуждающего полосковые линии.

Рассмотрим последовательность анализа полосковой структуры в предположении, что основным типом волн в ней являются квази-Т-волны [7]. Зависимости напряжений и токов от продольной координаты x в связанных линиях, не содержащих сосредоточенные неоднородности, подчиняются телеграфным уравнениям (1) [10]:

$$\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \mathbf{U}(x) \\ \mathbf{I}(x) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -(j\omega\mathbf{L}(x) + \mathbf{R}(x)) \\ -(j\omega\mathbf{C}(x) + \mathbf{G}(x)) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}(x) \\ \mathbf{I}(x) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{U}(x)$, $\mathbf{I}(x)$ – матрицы напряжений и токов в связанных линиях; $\mathbf{L}(x)$, $\mathbf{C}(x)$, $\mathbf{R}(x)$, $\mathbf{G}(x, t)$ – матрицы первичных параметров (индуктивностей, емкостей, сопротивлений и проводимостей), зависящие от продольной координаты x .

В нашем случае первичные параметры регулярны (не зависят от x) на участках $0 \leq x \leq l_1$, $l_1 < x \leq l_2$ и $l_2 < x \leq l_3$ связанных линий, в целом же имеем ступенчато-нерегулярную структуру, в которой функции зависимости первичных параметров от координаты не дифференцируемы в точках их скачкообраз-

ного изменения. Кроме этого, в связанные линии включены сосредоточенные элементы, образующие сосредоточенные неоднородности. Поэтому точное решение уравнений (1) для рассматриваемой полос-

ковой структуры затруднительно, т.к. токи в точках включения Z_{r1}, \dots, Z_{r4} меняются скачкообразно и не дифференцируемы.

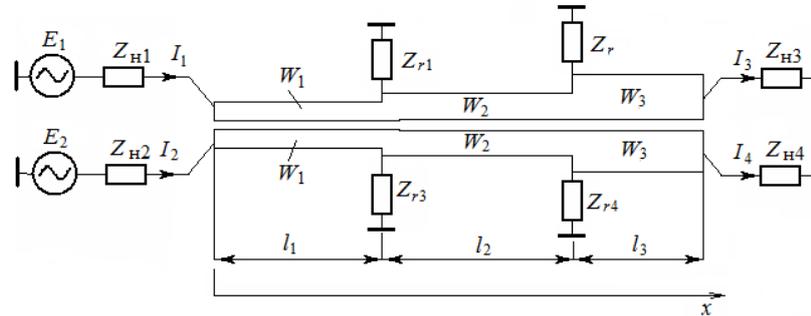


Рис. 1. Эквивалентная схема полосковой структуры, включающей отрезки ступенчато-нерегулярных связанных линий и сосредоточенные элементы

В работе [9] предложен и реализован конечно-разностный метод расчета нерегулярных структур, включающих сосредоточенные элементы. Метод основан на численном решении телеграфных уравнений связанных линий для структур с неоднородными по длине параметрами, содержащих сосредоточенные включения. Для этого отрезки нерегулярных связанных линий структуры разбиваются равномерной сеткой по координате x с шагом Δx . Первичные параметры «элементарных» отрезков, образованных в результате дискретизации структуры, считаются постоянными внутри отрезка с номером k . При этом первая производная напряжений и токов в выражении (1) заменяется приближенным разностным выражением [10, 11], в результате чего напряжения и токи в точке $k+1$ определяются через напряжения и токи в точке k при известных первичных параметрах $\mathbf{L}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{R}_k, \mathbf{G}_k$ элементарных отрезков длиной dl_k :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{k+1} \\ \mathbf{I}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_k \\ \mathbf{I}_k \end{bmatrix} - dl_k \left\{ j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{L}_k \mathbf{I}_k \\ \mathbf{C}_k \mathbf{U}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R}_k \mathbf{I}_k \\ \mathbf{G}_k \mathbf{U}_k \end{bmatrix} \right\}. \quad (2)$$

«Запуск» процесса вычисления \mathbf{U}_{k+1} и \mathbf{I}_{k+1} возможен разными способами. Так, в работах [10, 11] начальные значения (на первом шаге) \mathbf{U}_k и \mathbf{I}_k определены из матричного анализа структуры в результате декомпозиции на составные более простые части и последующей рекомпозиции структуры перемножением матриц передачи каскадно включенных восьмиполусников. В настоящей работе применено два способа определения \mathbf{U}_k и \mathbf{I}_k – аналогичный упомянутому выше и второй способ, основанный на получении экспериментальных значений \mathbf{U}_k и \mathbf{I}_k на выходе рассматриваемой полосковой структуры, представляемой эквивалентной схемой (см. рис. 1).

Рассмотрим более подробно последовательность вычисления волн, распространяющихся в исследуемой структуре.

Полигоны первичных параметров

Уравнения (2) записаны исходя из предположения, что для любой точки k волноведущей структуры

существуют по крайней мере первые производные $\frac{d\mathbf{U}(x)}{dx}$ и $\frac{d\mathbf{I}(x)}{dx}$. Однако наличие сосредоточенных неоднородностей означает существование скачка токов в точках включения Z_{r1}, \dots, Z_{r4} , и, следовательно, в этих точках производная не определена. Это противоречие вполне разрешается, если уменьшить dl_k до некоторой величины, которая сравнима с протяженностью контакта сосредоточенного элемента. Но одновременно с этим следует привести размерности первичных параметров и элементов с эквивалентными сопротивлениями Z_{r1}, \dots, Z_{r4} . Если эквивалентная схема сосредоточенного элемента представлена в виде емкости C_r , тогда в уравнения (2) вводится квазираспределенная емкость C_r/dl_k для соответствующего узла с номером k .

Назовем полигонами первичных параметров графическое представление первичных погонных параметров связанных полосковых линий в зависимости от продольной координаты, включая параметры сосредоточенных неоднородностей, отнесенные к длине элементарного отрезка dl_k .

В результате замены сосредоточенных Z_{r1}, \dots, Z_{r4} на квазираспределенные элементы получаем ступенчато-нерегулярную структуру с первичными параметрами, имеющими смысл погонных параметров.

Для удобства вычислений задача определения первичных параметров выделяется в самостоятельную задачу. Приведем пример формирования множеств $\mathbf{L}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{R}_k, \mathbf{G}_k$ полосковой структуры со следующими параметрами: ширина полосковых линий $w_1=1,1$; $w_2=5,6$; $w_3=7,3$ мм, длина линий $l_1=32,5$; $l_2=29,0$; $l_3=12,3$ мм, диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=10,2$, толщина подложки $h=0,635$ мм, величины сосредоточенных емкостей $C_{r1}=C_{r3}=1$ пФ, $C_{r2}=C_{r4}=0$ пФ. Расчет $\mathbf{L}_k, \mathbf{C}_k$ был проведен методом сеток [15].

Разбиение полосковой структуры по оси x выполнено с шагом $dl_k=3,69 \cdot 10^{-4}$ м, количество узлов

$M=200$. На рис. 2 и 3 показаны полигоны первичных параметров \mathbf{C}_k и \mathbf{L}_k , рассчитанные в виде зависимости элементов C_{11} , C_{12} , L_{11} , L_{12} матриц \mathbf{C}_k и \mathbf{L}_k от продольной координаты x_k .

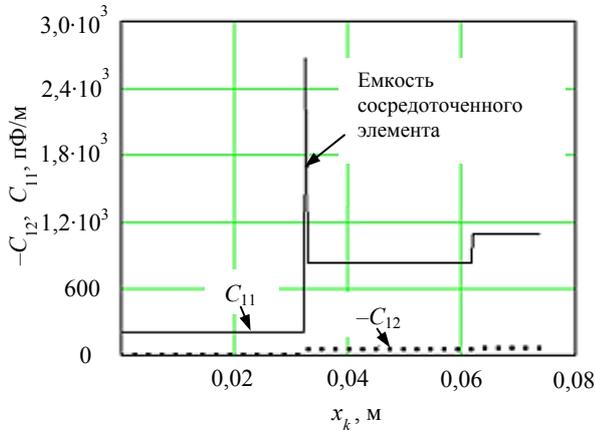


Рис. 2. Полигон погонных емкостей, включая емкость сосредоточенного элемента

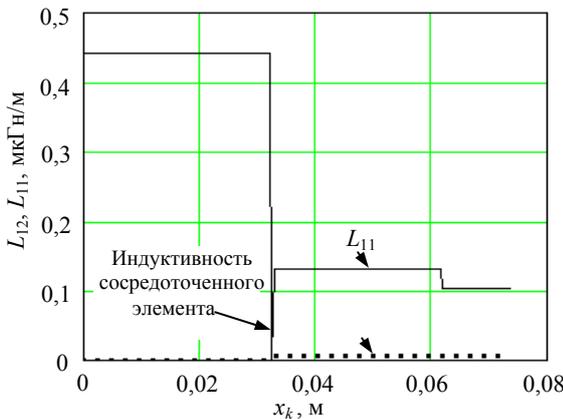


Рис. 3. Полигон погонных индуктивностей. Собственная и взаимная погонные индуктивности сосредоточенного элемента равны нулю

Несмотря на то, что показанные зависимости элементов матриц \mathbf{C}_k и \mathbf{L}_k характеризуются большим диапазоном изменения по направлению продольной координаты x_k , они однородны по физическому смыслу и являются погонными параметрами, не изменяемыми в пределах каждого из элементарных отрезков dl_k . Это дает основание считать, что функции $\mathbf{U}(x)$, $\mathbf{I}(x)$ при переходе к их представлению в виде множеств \mathbf{U}_k и \mathbf{I}_k дифференцируемы по x на всем пространстве x_k .

Полигоны погонных сопротивлений \mathbf{R}_k и проводимостей \mathbf{G}_k определяются так же, как \mathbf{C}_k , \mathbf{L}_k .

Определение граничных условий

Преодолев проблему разрывности функций $\mathbf{U}(x)$, $\mathbf{I}(x)$, перейдем к определению граничных условий, необходимых для решения телеграфных уравнений в конечно-разностной форме (2). Как уже отмечалось, для «запуска» процедуры решения системы (2) достаточно определить напряжения и токи

либо в точке x_0 , либо в точке x_M (M – количество точек разбиения структуры по координате x).

Приведем последовательность вычислений матриц напряжений \mathbf{U}_0 и токов \mathbf{I}_0 на входе полосковой структуры. Вторичные параметры, к которым относятся матрицы сопротивлений \mathbf{Z}_k и проводимостей \mathbf{Y}_k , вычисляются из формул (3) по известным первичным параметрам [7]:

$$\mathbf{Z}_k = i\omega\mathbf{L}_k + \mathbf{R}_k, \quad \mathbf{Y}_k = i\omega\mathbf{C}_k + \mathbf{G}_k. \quad (3)$$

Коэффициенты распространения синфазных и противофазных волн γ_k , распространяющихся в элементарных отрезках структуры dl_k , определяются в результате решения задачи нахождения собственных значений матрицы $\mathbf{a}_k = \mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k$:

$$\gamma_k = \sqrt{\lambda_k}, \quad (4)$$

где λ_k – собственные значения матрицы \mathbf{a}_k .

Матрицы передачи (ABCD – матрицы) элементарных отрезков определяются из выражения (5) [8]:

$$\mathbf{a}el_k = [\mathbf{A}m_k] \times [e^{\gamma_k \Delta l_k}] \times [\mathbf{A}m_k]^{-1}, \quad (5)$$

где

$$[e^{\gamma_k \Delta l_k}] = \begin{bmatrix} e^{-(\gamma_e)_k \Delta l_k} & 0 & & 0 \\ 0 & e^{-(\gamma_o)_k \Delta l_k} & & 0 \\ & & e^{(\gamma_e)_k \Delta l_k} & 0 \\ & & 0 & e^{(\gamma_o)_k \Delta l_k} \end{bmatrix},$$

$[\mathbf{A}m_k]$ – матрицы нормированных амплитуд синфазных и противофазных волн; $(\gamma_e)_k$, $(\gamma_o)_k$ – коэффициенты распространения синфазных и противофазных волн, находимые из (4).

Матрица нормированных амплитуд $[\mathbf{A}m_k]$ была введена в работе [16], она имеет следующий вид

$$[\mathbf{A}m_k] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ (d_e)_k & (d_o)_k & (d_e)_k & (d_o)_k \\ (Y_{1e})_k & (Y_{1o})_k & -(Y_{1e})_k & -(Y_{1o})_k \\ (Y_{2e})_k & (Y_{2o})_k & -(Y_{2e})_k & -(Y_{2o})_k \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Входящие в матрицу (6) элементы вычисляются так:

$$(d_{e,o})_k = ((\gamma_{e,o})_k^2 - (\alpha_{11})_k) / (\alpha_{12})_k; \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} (Y_{1e})_k & (Y_{1o})_k \\ (Y_{2e})_k & (Y_{2o})_k \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_k \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ (d_e)_k & (d_o)_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ (\gamma_e)_k & 1 \\ 0 & (\gamma_o)_k \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Поскольку первичные параметры определены и матрицы элементарных отрезков также найдены, используя формулы (3)–(8), находим матрицу передачи рассматриваемой полосковой структуры в виде произведения матриц передачи отрезков dl_k

$$\mathbf{a} = \prod_{k=0}^M \mathbf{a}el_k. \quad (9)$$

Используя связь напряжений, токов и ЭДС на входе и выходе структуры, получим соотношение для токов на входе:

$$\mathbf{I}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \delta \cdot (\beta)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z_{н1} & 0 \\ 0 & Z_{н2} \end{bmatrix}^{-1} \times \left[\delta \cdot (\beta)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \right], \quad (10)$$

где

$$\beta = \begin{bmatrix} a_{1,3} + a_{1,1} \cdot Z_{н3} & a_{1,4} + a_{1,2} \cdot Z_{н4} \\ a_{2,3} + a_{2,1} \cdot Z_{н3} & a_{2,4} + a_{2,2} \cdot Z_{н4} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\delta = \begin{bmatrix} a_{3,3} + a_{3,1} \cdot Z_{н3} & a_{3,4} + a_{3,2} \cdot Z_{н4} \\ a_{4,3} + a_{4,1} \cdot Z_{н3} & a_{4,4} + a_{4,2} \cdot Z_{н4} \end{bmatrix}.$$

Напряжения на входе структуры находятся из очевидной их связи по закону Ома:

$$\mathbf{U}_0 = \begin{bmatrix} -I_1 \cdot Z_{н1} \\ -I_2 \cdot Z_{н1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Таким образом, получены напряжения и токи при $k=0$, что достаточно для старта при решении телеграфных уравнений (2) в конечно-разностной форме.

Как отмечалось ранее, решение уравнений (2) может быть начато и с точки $k=M$. В этом случае напряжения и токи на выходе полосковой структуры находятся из выражения (13):

$$\mathbf{I}_M = \beta^{-1} \cdot \begin{bmatrix} E_1 - (I_1)_0 \cdot z_1 \\ E_2 - (I_2)_0 \cdot z_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_M = \begin{bmatrix} (I_1)_M \cdot z_3 \\ (I_2)_M \cdot z_4 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Алгоритм и результаты решения конечно-разностных телеграфных уравнений

А. Решение системы уравнений (2) при рассчитанных напряжениях и токах в точке $k=M$.

Алгоритм состоит в выполнении следующей последовательности вычислений:

1. Дискретизация структуры на M конечных элементов таким образом, чтобы сосредоточенные неоднородности попали в узлы сетки.
2. Определение первичных параметров и построение их полигонов.
3. Вычисление напряжений и токов в точке $k=M$.
4. Решение системы, которое иллюстрируется подпрограммой, реализованной в системе математического моделирования Math-Cad:

$$\text{UIXL}_{i,s} := \begin{cases} \text{для } s \in M \dots 0, \\ \text{UIXL}_{i,s} \leftarrow \left[\prod_{s=s}^M (\mathbf{ael}_{i,s})^{-1} \right] \cdot \text{UII}_i, \\ \text{UIXL}_{i,s}. \end{cases} \quad (14)$$

В представленной записи подпрограммы (14) применены следующие обозначения: i – переменная цикла по частоте; s – переменная цикла по координате; $\text{UIXL}_{i,s}$ – матрица полных напряжений и токов, зависящих от частоты и координаты; UII_i – матрица напряжений и токов в конце структуры; $\mathbf{ael}_{i,s}$ – матрица передачи элементарного отрезка структуры.

Расчет волнового процесса ведется, как это видно из организации цикла по координате, от конца структуры к ее началу.

Б. Решение системы уравнений (2) при рассчитанных напряжениях и токах в точке $k=0$.

Алгоритм повторяет п. 1–3. Решение системы в виде подпрограммы записывается так:

$$\text{UIXL}_{i,s} := \begin{cases} \text{для } s \in 0 \dots M, \\ \text{UIXL}_{i,s} \leftarrow \left[\prod_{s=s}^0 (\mathbf{ael}_{i,s})^{-1} \right] \times \text{UI0}_i, \\ \text{UIXL}_{i,s}. \end{cases} \quad (15)$$

Фрагмент подпрограммы (15) по сравнению с (14) позволяет проводить расчет волнового процесса от начала структуры к ее концу. При этом вычисляется матрица передачи, обратная матрице передачи, находимой из (5).

Пример расчета зависимости напряжения в первом проводнике полосковой структуры с ранее представленными параметрами показан на рис. 4. Нагрузочные сопротивления взяты при вычислениях: $Z_{н1} = Z_{н2} = 100 \text{ Ом}$, $Z_{н3} = Z_{н4} = 7 \text{ Ом}$. Расчет по варианту А (сплошная кривая) и варианту Б (кривая точками) дал практически одинаковые результаты, что и следовало ожидать. Однако при расчете по варианту Б время вычислений увеличилось, т.к. в выражении (15) присутствует обратная матрица.

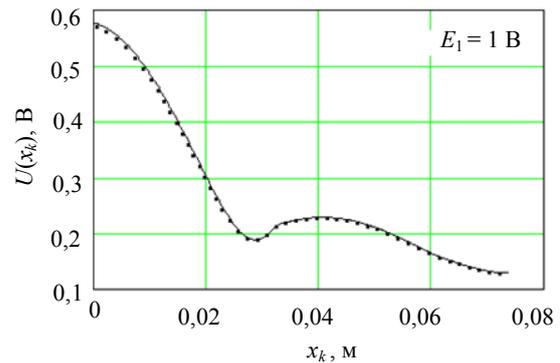


Рис. 4. Зависимость полного напряжения в первом проводнике полосковой структуры от координаты

Решение конечно-разностных телеграфных уравнений с использованием экспериментальных данных

Для решения уравнений (2) на основе экспериментальных данных был взят макет устройства, состоящий из двух встречно включенных полосковых структур (рис. 5). Это позволило корректно измерить коэффициент передачи S_{21} устройства с помощью векторного анализатора цепей «Обзор-103», т.к. на выходе можно использовать согласованную нагрузку 50 Ом.

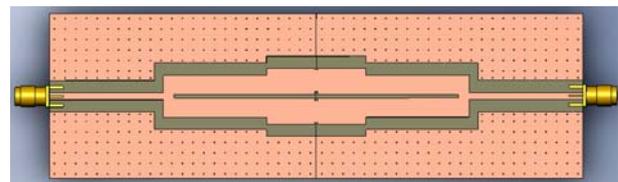


Рис. 5. Внешний вид встречно-каскадного соединения двух идентичных макетов структур с эквивалентной схемой рис. 1

Было проведено измерение на частоте $f = 741,13$ МГц. Получены следующие экспериментальные значения: $|S_{21}| = -0,36891$ дБ, $\arg(S_{21}) = -402,69$ град. В пересчете на абсолютное значение напряжения при $E_1 = 1$ В в первом проводнике полосковой структуры это составило $|U_1| = 0,479$ В. Соответственно получилась матрица выходных напряжений и токов UPL (обозначение матрицы по (14)):

$$UPL = \begin{bmatrix} 0,404 - i0,257 & \\ 0,404 - i0,257 & \\ 4,04 \times 10^{-3} - i2,57 \times 10^{-3} & \\ 4,04 \times 10^{-3} - i2,57 \times 10^{-3} & \end{bmatrix}.$$

По этой матрице был рассчитан волновой процесс в первом проводнике полосковой структуры в виде зависимости полного напряжения от координаты. Выполнен также расчет по данным вычислений граничных условий. Результаты отображены на рис. 6, на котором сплошная кривая получена при вычисленных граничных условиях, точками – зависимость, полученная по экспериментальным значениям UPL.

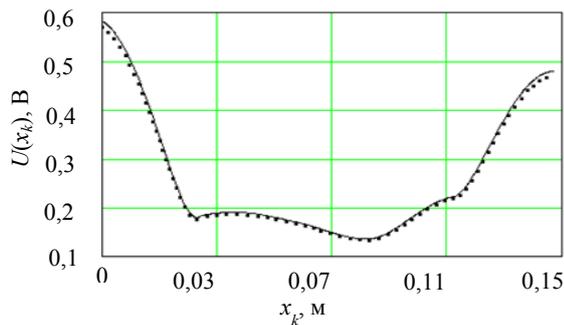


Рис. 6. Зависимость полного напряжения в первом проводнике полосковой структуры от координаты, рассчитанная по экспериментально полученной матрице напряжений и токов на выходе полоскового устройства (точки) и по рассчитанным напряжениям и токам (сплошная кривая). Устройство состоит из двух встречно включенных структур (см. рис. 1)

Сравнение кривых на рис. 6 показало их совпадение с расхождением меньше 1% (на рис. 6 кривые искусственно смещены), что подтверждает работоспособность предлагаемого расчетно-экспериментального метода анализа волновых процессов в ступенчато-нерегулярных полосковых структурах с сосредоточенными неоднородностями.

Анализ частотных характеристик ступенчато-нерегулярных полосковых структур с сосредоточенными неоднородностями путем решения конечно-разностных уравнений

Для проверки достоверности анализа частотных характеристик на основе численного решения конечно-разностных уравнений проведены экспериментальные измерения параметров устройства, состоящего из двух встречно включенных полосковых структур, показанных на рис. 1.

Основные соотношения, необходимые для анализа частотных характеристик устройства, были изложены при определении граничных условий. Зависимость напряжений и токов от координаты рассчитывалась по программе, фрагмент которой записывается так:

$$UIX_{i,k+1} := UIX_{i,k} - \Delta x \cdot \begin{bmatrix} (Z_{i,k})_{0,0} \cdot (UIX_{i,k})_2 + (Z_{i,k})_{0,1} \cdot (UIX_{i,k})_3 \\ (Z_{i,k})_{1,0} \cdot (UIX_{i,k})_2 + (Z_{i,k})_{1,1} \cdot (UIX_{i,k})_3 \\ (Y_{i,k})_{0,0} \cdot (UIX_{i,k})_0 + (Y_{i,k})_{0,1} \cdot (UIX_{i,k})_1 \\ (Y_{i,k})_{1,0} \cdot (UIX_{i,k})_0 + (Y_{i,k})_{1,1} \cdot (UIX_{i,k})_1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

В этой записи $UIX_{i,k}$ – матрица напряжений и токов, ее начальное значение при $k=0$ рассчитывается из (10), (12); Δx – шаг по координате x ; i – индекс частоты; k – номер элементарного отрезка структуры; $Z_{i,k}, Y_{i,k}$ – матрицы сопротивлений и проводимостей, находимые из (3).

Расчет напряжений и токов по (14) и (16) дал близкие значения. По найденным напряжениям и токам в точке $k=0$ определена матрица входных сопротивлений полосковых проводников

$$Z_{in} = \begin{bmatrix} (U_1)_0 & 0 \\ 0 & (U_2)_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (I_1)_0 & 0 \\ 0 & (I_2)_0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (17)$$

и коэффициентов отражения по входу

$$\Gamma = \begin{bmatrix} (-z_1 + (Z_{in})_1) \cdot (z_1 + (Z_{in})_1)^{-1} \\ (-z_2 + (Z_{in})_2) \cdot (z_2 + (Z_{in})_2)^{-1} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Экспериментально измерялись возвратные $|S_{11}|$ и вносимые потери $|S_{21}|$ в устройстве, состоящем из двух встречно-каскадно включенных полосковых структур (см. рис. 5). Расчет $|S_{11}|$ проведен по известному коэффициенту отражения (18), а вычисление $|S_{21}|$ – по программам (14) и (16), реализующим алгоритмы решения конечно-разностных телеграфных уравнений (2). Сравнение частотной зависимости расчетных и экспериментальных возвратных потерь показано на рис. 7. На рис. 8 показано сравнение вносимых потерь, полученных экспериментально и путем расчета.

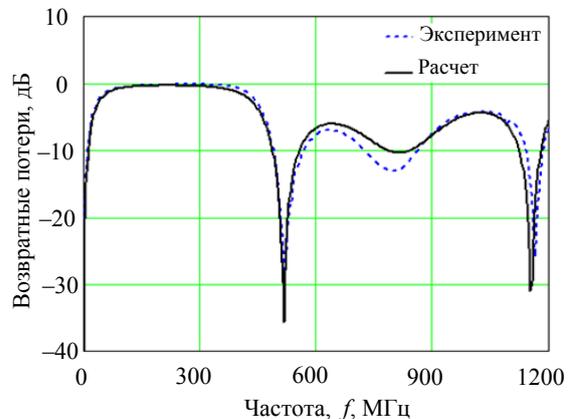


Рис. 7. Рассчитанная и экспериментальная частотная зависимость возвратных потерь полоскового устройства из двух встречно включенных структур (см. рис. 6)

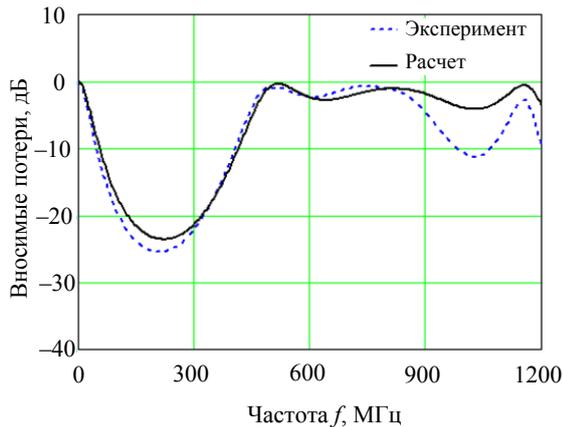


Рис. 8. Рассчитанная и экспериментальная частотная зависимость вносимых потерь полоскового устройства из двух встречно включенных структур (см. рис. 6)

Наблюдается хорошее качественное и количественное совпадение результатов расчета и эксперимента. Это дает основание сделать заключение о том, что расчет волновых процессов в рассматриваемой структуре на основе конечно-разностных уравнений корректен.

Применение полученных результатов

Опишем одно из применений расчетно-экспериментального метода для решения задачи экстракции параметров полосковых структур, получившихся в результате изготовления с существенными технологическими дефектами.

Спроектировано устройство с известными конструктивными и электрофизическими параметрами и проведен анализ его характеристик на основе численного решения телеграфных уравнений. При этом получены возвратные потери $|S_{11}(f)|$, вносимые потери $|S_{21}(f)|$ и фазовая задержка $\arg(S_{21}(f))$. Однако в процессе экспериментальных исследований получены иные, существенно отличающиеся параметры рассеяния: $|S_{11}^{\text{exp}}(f)|$, $|S_{21}^{\text{exp}}(f)|$, $\arg(S_{21}^{\text{exp}}(f))$.

Процесс экстракции параметров будем рассматривать как уточнение полигонов первичных параметров C_k и L_k . Для этого производится минимизация функций

$$\min\left(\left\|S_{11}^{\text{exp}}(f) - |S_{11}(f)|\right\|\right), \quad (19)$$

$$\min\left(\left\|S_{21}^{\text{exp}}(f) - |S_{21}(f)|\right\|\right), \quad (20)$$

$$\min\left(\left|\arg(S_{21}^{\text{exp}}(f)) - \arg(S_{21}(f))\right|\right). \quad (21)$$

Приведем пример. Рассчитан двухканальный трансформатор импедансов для согласования двухканальной цепи, имеющей входное сопротивление по каждому каналу 100 Ом, а выходное сопротивление 7 Ом. Характеристики такой цепи в виде частотной зависимости $|S_{11}(f)|$, $|S_{21}(f)|$ приведены на рис. 7 и 8 сплошными линиями. После изготовления

макета были измерены частотные характеристики устройства и проведено их сравнение с ранее рассчитанными путем построения функций (19)–(21). Минимизация указанных функций проводится изменением первичных параметров, образующих полигоны C_k и L_k . Было показано, что минимум (19)–(21) достигается при изменении полигона C_k отрезка с длиной $l_2 = 29,0$ мм. Разность матриц экспериментального макета и проектного решения составила

$$C_k^{\text{exp}} - C_k = \begin{bmatrix} 1,71 & 0 \\ 0 & 1,71 \end{bmatrix} \times 10^{-10}, \quad (l_1 < x < l_2).$$

Отсюда можно сделать вывод, что наиболее вероятная причина роста диагональных элементов матрицы C_k^{exp} – увеличение ширины полосок W_2 (см. рис. 2).

Обсуждение результатов

Приведенные результаты решения задачи исследования волновых процессов в ступенчато-нерегулярных полосковых структурах с сосредоточенными неоднородностями распространяемы на другие типы направляющих систем с квази-Т-волнами: коаксиальные, проводные и комбинированные. Важными особенностями рассмотренного подхода, основанного на решении конечно-разностных телеграфных уравнений, являются:

1. Процедура решения конечно-разностных уравнений может базироваться на экспериментальных результатах, а именно на знании величин напряжений и токов на входе и/или выходе структуры и конструктивных параметров связанных полосковых линий (размеров поперечного сечения, толщины диэлектрических слоев, их относительной диэлектрической проницаемости, длины полосок). Рассмотренные варианты численного решения телеграфных уравнений обладают устойчивостью по критерию Куранта–Фридрикса–Леви при $M \geq 200$, т.к.

$$2f_{\text{max}} \frac{\Delta x \cdot \pi}{v_c} \ll 1. \quad (22)$$

Входящие в (22) параметры взяты следующие: $f_{\text{max}} = 1$ ГГц – максимальная частота; $\Delta x \leq 7,4 \cdot 10^{-4}$ мм – шаг дискретизации полосковой структуры при $M = 200$, уменьшающийся с ростом M ; $v_c = 1,023 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения синфазной волны в связанных линиях [17, 18].

2. Приведенные соотношения и алгоритм анализа волновых процессов в связанных линиях позволяют исследовать волновые свойства и частотные характеристики устройств на основе расчетно-экспериментального подхода, что облегчает постановку и решение задач экстракции неизвестных или изменяющихся под действием внешних факторов параметров направляющих систем.

3. Возможность проводить анализ частотных характеристик и распространения волн по продольной координате открывает перспективу TDR анализа и его связи с получаемыми экспериментальными данными при импульсном воздействии.

4. При анализе учитывается распространение синфазных и противофазных волн в связанных линиях с различающимися фазовыми скоростями, амплитуды и фазы которых могут изменяться под влиянием сосредоточенных неоднородностей.

Заключение

Таким образом, в данной работе решена задача моделирования волновых процессов в ступенчато-нерегулярных полосковых структурах, содержащих сосредоточенные неоднородности на основе итерационной процедуры решения конечно-разностных телеграфных уравнений в частотной области. Путем введения понятия полигона первичных параметров установлена физическая однородность распределенных структур с сосредоточенными неоднородностями и упрощена процедура решения конечно-разностных телеграфных уравнений. Проведено решение конечно-разностных уравнений в случае определения граничных условий экспериментальным путем, что открывает возможности определения неизвестных параметров связанных линий путем экстракции параметров на основе полученной математической модели.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, соглашение № 14.577.21.0279 от 26.09.2017, идентификатор RFMEFI57717X0279.

Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам СКБ «Смена» м.н.с. С.А. Артищеву, магистранту А.В. Андрееву, студенту Г.А. Малютину за помощь в макетировании и проведении экспериментальных измерений, выполненных на оборудовании ЦКП «Импульс» ТУСУР.

Литература

1. Маттей Д.Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Д.Л. Маттей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс / пер. с англ. под ред. Л.В. Алексеева, Ф.В. Кушира. – М.: Связь, 1971. – 440 с.
2. Gonzalez G. Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design, 2nd ed. – Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997. – 94 p.
3. Бабак Л.И. Автоматизированный синтез СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма и использования идеальных трансформаторов импеданса / Л.И. Бабак, А.А. Калентьев, И.М. Добуш // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 (37). – С. 67–84.
4. Optimization of Compact UWB Monopole Antenna with Tapered Connection and Linier Tapered Transformer / Firdaus, Yulindon, Meza Silvana, Asrial, Riswan Efendi and Noor Azah Samsudin. // 2018 International Conference on Applied Information Technology and Innovation (ICAITI). – 2018. – P. 166–169.
5. Cataldo A. A combined TD-FD method for enhanced reflectometry measurements in liquid quality monitoring / A. Cataldo, L. Catarinucci et al. // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2009. – Vol. 58, Iss. 10. – P. 3534–3543.
6. Тренкаль Е.И. Измерение уровней жидкостей методом импульсной рефлектометрии (обзор) / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 67–73.
7. Vlostovskiy E.G. Theory of coupled transmission lines // Teleconrmun. and Radio Engrg. – 1967. – Vol. 21, April. – P. 87–93.
8. Vorob'ev P.A. Quasi-T-waves in devices using coupled strip lines with unbalanced electromagnetic coupling / P.A. Vorob'ev, N.D. Malyutin, V.N. Fedorov // Radio Engineering and Electronic Physics (English translation of Radiotekhnika i Elektronika). – 1982. – Vol. 27 (9). – P. 38–44.
9. Малютин Н.Д. Квази-Т-волны в комбинированных структурах на основе нерегулярных линий передачи с сосредоточенными неоднородностями / Н.Д. Малютин, А.Г. Лощилов, Э.В. Семенов // Доклады ТУСУР. – 2005. – № 4 (12). – С. 42–49.
10. Exceptional Points of Degeneracy and Branch Points for Coupled Transmission Lines – Linear-Algebra and Bifurcation-Theory Perspectives / G.W. Hanson, A.B. Yakovlev, M.A.K. Othman, F. Capolino // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 67, Is. 2. – P. 1025–1034. DOI: 10.1109/TAP.2018.2879761
11. Xu F., Wu K. Finite-difference time-domain method based on telegraph equations and its applications to modelling of large-scale grounding systems. 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 21–24 May 2012. – Singapore, 2012. – P. 717–720. DOI: 10.1109/apemc.2012.6237981.
12. Bakhtin A.O. Detection of an unauthorized wired connection to a local area network by solving telegraph equations system / A.O. Bakhtin, V.S. Sherstnev, I.L. Pichugova, V.V. Dudorov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 12–14 May 2016. – Moscow, Russia. – P. 1–5. DOI: 10.1109/sibcon.2016.7491804.
13. Li C. A finite difference method for time-fractional telegraph equation / C. Li, J. Cao // Proceedings of 2012 IEEE/ASME 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, 8–10 July 2012. – Suzhou, China. – P. 314–318. DOI: 10.1109/mesa.2012.6275581
14. Rutkas A.G. Time-domain descriptor models for circuits with multiconductor transmission lines and lumped elements / A.G. Rutkas, L.A. Vlasenko / 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 6–10 Sept. 2010. – Sevastopol, Ukraine. – P. 102–104. – DOI: 10.1109/uwbuis.2010.5609106.
15. Vincent F. Fusco. Microwave Circuits Analysis and Computer-Aided Design. – Prentice-Hall International (UK) Ltd., 1987. – 358 p.
16. Малютин Н.Д. Матричные параметры неодинаковых связанных полосковых линий с неоднородным диэлектриком // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 21, № 12. – С. 2473–2478.
17. Courant R. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik / R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy // Mathematische Annalen. – 1928. – Vol. 100, No. 1. – P. 32–74. IBM Journal, march 1967. web.stanford.edu.
18. Федоров В.Н. Двухмерная электродинамическая модель неоднородной среды с потерями / В.Н. Федоров, Л.Л. Федорова, К.О. Соколов // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 132–137.

Тренкаль Евгений Игоревич

Аспирант каф. конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР) ТУСУРа

Мл. науч. сотр. НИИ иистем электрической связи ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-913-816-57-16

Эл. почта: trenkal@mail.ru

Малютин Николай Дмитриевич

Д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотр.

НИИ систем электрической связи ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID 0000-0003-0317-9096.

Тел.: +7 (382-2) 52-79-42

Эл. почта: ndm@main.tusur.ru

Лощилов Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, зав. каф. КУДР, начальник СКБ «Смена»

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-906-947-69-20

Эл. почта: main@skbsmena.ru

Федоров Вячеслав Николаевич

Канд. техн. наук, доцент

Северо-Восточного федерального ун-та им. М.К. Аммосова

Белинского ул., д. 58, г. Якутск, Россия, 677000

Тел. +7-411-236-17-54

Эл. почта: fvnjgti@rambler.ru

Trenkal E.I., Malyutin N.D., Loschilov A.G., Fedorov V.N.

Computational experimental method of analyzing waves in irregular coupled strip lines with lumped inhomogeneities

A numerical solution to analyze wave processes in coupled irregular strip lines based on the finite-difference form of telegraph equations is considered. Two ways of defining boundary conditions are considered: calculation of voltages and currents at the beginning and at the end of a strip structure using matrix analysis; determination of voltages and currents in the measurement process using vector analyzers. Matrix analysis of step irregular strip lines is carried out when setting the primary parameters in the form of polygons. The introduction of primary parameters polygons eliminated the problem of determining the derivatives of the functions of voltages and currents at the points of inclusion of concentrated inhomogeneities. An example of the calculation of voltage waves and currents in a two-channel impedance transformer is given. A comparison of the calculated and experimental results of a device based on the stepped-irregular coupled strip lines confirming the applicability of the proposed experimental method is presented.

Keywords: irregular coupled strip lines, transformer impedances, finite difference telegraph equations, polygons of primary parameters.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-17-25

References

1. Matthaei G., Young L., Jones M.T. *Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures*. Artech House, Inc., 1980. 1096 p.

2. Gonzalez G. *Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997. 94 p.

3. Babak L.I., Kalentyev A.A., Dobush I.M. Automated synthesis of microwave low-noise amplifiers using genetic

algorithm and ideal impedance transformers. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, no 3(37), pp. 67–84 (in Russ.).

4. Firdaus, Yulindon, Meza Silvana, Asrial, Riswan Efendi and Noor Azah Samsudin. Optimization of Compact UWB Monopole Antenna with Tapered Connection and Linier Tapered Transformer. *2018 International Conference on Applied Information Technology and Innovation (ICAITI)*, 2018, pp. 166–169.

5. Cataldo A., Catarinucc L., Tarricone L., Attivissimo F., Piuze E. A combined TD-FD method for enhanced reflectometry measurements in liquid quality monitoring. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2009, vol. 58, Iss. 10, pp. 3534–3543.

6. Trenkal E.I., Loschilov A.G. Measurement of liquid levels using time-domain reflectometry method. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 67–73.

7. Vlostovskiy E.G. Theory of coupled transmission lines. *Telecommunication and Radio Engineering*; 1967, vol. 21, April, pp. 87–93.

8. Vorob'ev P.A., Malyutin N.D., Fedorov V.N. Quasi-T-waves in devices using coupled strip lines with unbalanced electromagnetic coupling. *Radio Engineering and Electronic Physics (English translation of Radiotekhnika i Elektronika)*, 1982, 27 (9), pp. 38–44.

9. Malyutin N.D., Loschilov A.G., Semyonov E.W. Quasi-T-waves in combined structures on basis of irregular transmission line with lumped heterogeneities. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 4 (12), pp. 42–49 (in Russ.).

10. Hanson G.W., Yakovlev A.B., Othman M.A.K., Capolino F. Exceptional Points of Degeneracy and Branch Points for Coupled Transmission Lines – Linear-Algebra and Bifurcation-Theory Perspectives. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, vol. 67, Is. 2, pp. 1025–1034. DOI: 10.1109/TAP.2018.2879761.

11. Xu F., Wu K. Finite-difference time-domain method based on telegraph equations and its applications to modelling of large-scale grounding systems. *2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 21–24 May 2012, Singapore, pp. 717–720. DOI: 10.1109/apemc.2012.6237981.

12. Bakhtin A.O., Sherstnev V.S., Pichugova I.L., Dudorov V.V. Detection of an unauthorized wired connection to a local area network by solving telegraph equations system. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 12–14 May 2016, Moscow, Russia, pp. 1–5. DOI:10.1109/sibcon.2016.7491804.

13. Li C., Cao J. A finite difference method for time-fractional telegraph equation. *Proceedings of 2012 IEEE / ASME 8th IEEE / ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, 8–10 July 2012, Suzhou, China, pp. 314–318. DOI: 10.1109/mesa.2012.6275581.

14. Rutkas A.G., Vlasenko L.A. Time-domain descriptor models for circuits with multiconductor transmission lines and lumped elements. *2010 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, 6–10 Sept. 2010, Sevastopol, Ukraine, pp. 102–104. DOI: 10.1109/uwbuis.2010.5609106.

15. Vincent F. Fusco. *Microwave Circuits Analysis and Computer-Aided Design*. Prentice-Hall International (UK) Ltd., 1987. 358 p.

16. Malyutin N.D. Matrix parameters of unequal coupled striplines with inhomogeneous dielectrics. *Radio Engineering and Electronics*, 1976, vol. 21, no. 12, pp. 2473–2478 (in Russ.).

17. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik.

Mathematische Annalen, 1928, V. 100, № 1, pp. 32–74. *IBM Journal*, march 1967. Available at: web.stanford.edu.

18. Fedorov V.N., Fedorova L.L., Sokolov K.O. Two-dimensional electro-dynamic model of an inhomogeneous environment with losses. *Successes of Modern Natural Science*, 2018, № 10, pp. 132–137 (in Russ.).

Evgeniy I. Trenkal

Postgraduate student, Department of Design of Radio Electronic Components Tomsk State University of Control System and Radioelectronics (TUSUR)
Junior Researcher, Institute of Telecommunications Systems
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-816-57-16
Email: trenkal@mail.ru

Nickolay D. Malyutin

Doctor of Engineering, Professor, Chief Researcher
Research Institute of Electrical Communications TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID 0000-0003-0317-9096
Phone: +7 (382-2) 52-79-42
ndm@main.tusur.ru

Anton G. Loshchilov

Candidate of Engineering, Head
Department of Design of Radio Electronic Components TUSUR,
Head, Special Design Bureau «Smena»
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-906-947-69-20
E-mail: main@skbsmena.ru

Vyacheslav N. Fedorov

Candidate of Engineering, Associate Professor,
North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov
58, Belinsky st., Yakutsk, 677000
Phone: +7-411-236-17-54
Email: fvnjgti@rambler.ru

УДК 621.396.41

В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов

Новый способ трёхкратного резервирования межсоединений

Решается задача повышения надежности и помехозащищенности радиоэлектронной аппаратуры. Рассматривается возможность использования резервирования её межсоединений для повышения не только надежности, но и помехозащищенности за счет явления модального разложения. Для реализации этого предлагается новый способ 3-кратного резервирования, отличающийся использованием электромагнитной связи между резервируемым и резервными межсоединениями, зеркальной симметрии поперечного сечения результирующей структуры и лишь 2-слойной конструкции. Приведено поперечное сечение варианта печатной платы, реализующей предлагаемый способ. Выполнено моделирование распространения сверхкороткого импульса по межсоединению платы. Показано уменьшение его амплитуды в 4 раза за счет модального разложения.

Ключевые слова: резервирование, межсоединения, печатная плата, модальное разложение, сверхкороткий импульс, зеркальная симметрия.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-26-30

Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) всё больше проникает в жизнь общества. При недостаточном внимании к повышению надежности и помехозащищенности РЭА общество становится все более зависимым от неё. Это создает неудобства и проблемы для обычной РЭА и совершенно недопустимо для РЭА, например в транспортной, атомной и военной отраслях.

Широко известным и распространенным путем повышения надежности является холодное резервирование, когда при выходе из строя функционирующей цепи подается питание на другую, и функционирует уже она. Пример резервируемой и резервной схем, расположенных зеркально относительно вертикали на одной стороне печатной платы, показан на рис. 1, а реального блока, с их расположением на разных сторонах металлического основания – на рис. 2. Для 3-кратного резервирования могут совмещаться оба показанных варианта. Однако, в любом случае при работе одной схемы другие не используются и почти не оказывают влияния на её работу. При выходе из строя начинает работать одна из резервных.

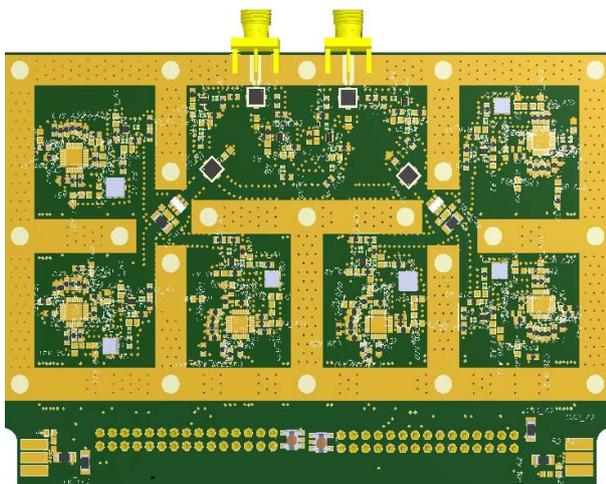
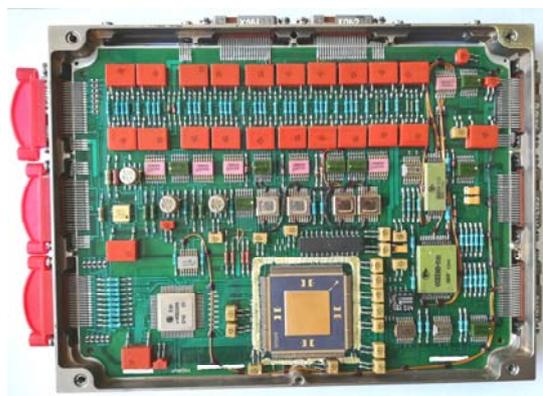
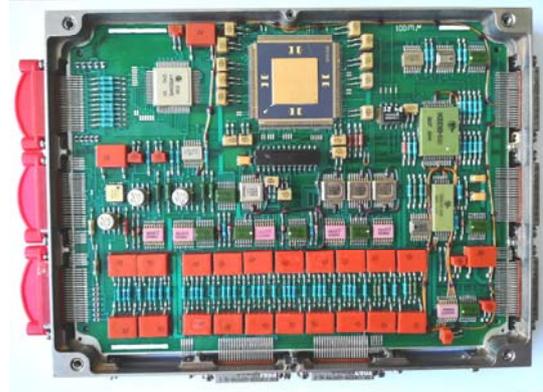


Рис. 1. 3D-вид резервируемой и резервной схем, расположенных зеркально относительно вертикали на одной стороне печатной платы



а



б

Рис. 2. Фотографии резервируемой и резервной печатных плат, расположенных на сторонах А (а) и Б (б)

При штатной работе РЭА резервные устройства не используются, но кратно увеличивают массу, размеры и стоимость РЭА. Защита от кондуктивных воздействий обычно достигается за счет включения помехозащитных устройств, а от излучаемых – за счет экранирования, что также увеличивает массу, размеры и стоимость РЭА, но часто неприемлемо: например, в космических аппаратах, подводных лодках и при массовом производстве соответственно. Таким образом, актуально повышение надежности и помехозащищенности РЭА за счет поиска новых способов для этого. В частности, актуальна за-

щита от воздействия мощного сверхкороткого импульса (СКИ).

В этой связи показательна работа [1], в которой впервые предложено объединить резервирование и модальную фильтрацию в единое целое, на основе чего предложен и обоснован новый способ трассировки печатных трасс для цепей с резервированием, позволяющий повысить помехозащищенность РЭА. На основе этой работы запатентовано 6 способов резервирования [2–7], обеспечивающих повышение не только надежности, но и помехозащищенности, используя явление модального разложения за счет электромагнитной связи между резервируемыми проводниками в неоднородной диэлектрической среде. Эти способы предназначены для 1-кратного резервирования межсоединений (резервируемое и резервирующее), а между тем в критичных приложениях может требоваться более высокая надежность. Для этого предложен способ 3-кратного резервирования межсоединений (резервируемое и три резервирующих) [8]. Он предназначен для многослойных печатных плат (МПП) и нереализуем на двусторонних печатных платах (ДПП). Между тем удорожание из-за 3-кратного резервирования актуально компенсировать, если не полностью, то хотя бы, частично, и это привлекательно сделать за счет простоты конструкции и дешевизны изготовления ДПП.

Цель работы – представить новый способ 3-кратного резервирования, отличающийся использованием электромагнитной связи между резервируемым и резервными межсоединениями, зеркальной симметрии поперечного сечения результирующей структуры и лишь 2-слойной конструкции. Для этого кратко рассмотрены два наиболее близких аналога предлагаемого способа, приведено поперечное сечение варианта ДПП, реализующего этот способ, выполнено моделирование распространения СКИ по межсоединению ДПП и показано уменьшение его амплитуды в 4 раза за счет модального разложения.

Аналоги нового способа

Как известно из патентного регламента, способ является более широким понятием, чем устройство. Одним из следствий этого является тот факт, что на основе одного способа можно предложить много различных устройств. Между тем суть нового способа и его отличия от наиболее близких аналогов проще пояснить на примере конкретных устройств.

Упомянутый способ 3-кратного резервирования [8] представлен на конкретном примере МПП, имеющей четыре слоя проводников (рис. 3, а). Верхний и нижний слои представляют опорный проводник (О) в виде двух сплошных проводящих плоских поверхностей (полигонов), которые могут выполнять функции схемной земли и питания. На двух промежуточных слоях расположены сигнальные проводники, по два на каждом слое. Резервируемая (активная) цепь представлена полоской (А) и электронным компонентом, например резистором (компонент 1), соединенным с ней и верхним слоем, а три резервирующих (пассивных) цепи представле-

ны соответствующими полосками (П) и компонентами 2–4. Впрочем, благодаря зеркальной симметрии по вертикальной и горизонтальной осям все четыре полоски и компонента одинаковы и понятие «резервируемый» применимо к любому из них, а «резервирующий» – к трем остальным. Моделирование распространения СКИ с амплитудой ЭДС 2 В показало (рис. 3, в) амплитуду напряжения на выходе около 0,25 В за счет модального разложения СКИ на четыре импульса меньшей амплитуды [8]. Таким образом, ослабление (здесь и далее к половине амплитуды ЭДС) составило 4 раза, но, как упоминалось, недостаток способа состоит в дороговизне МПП.

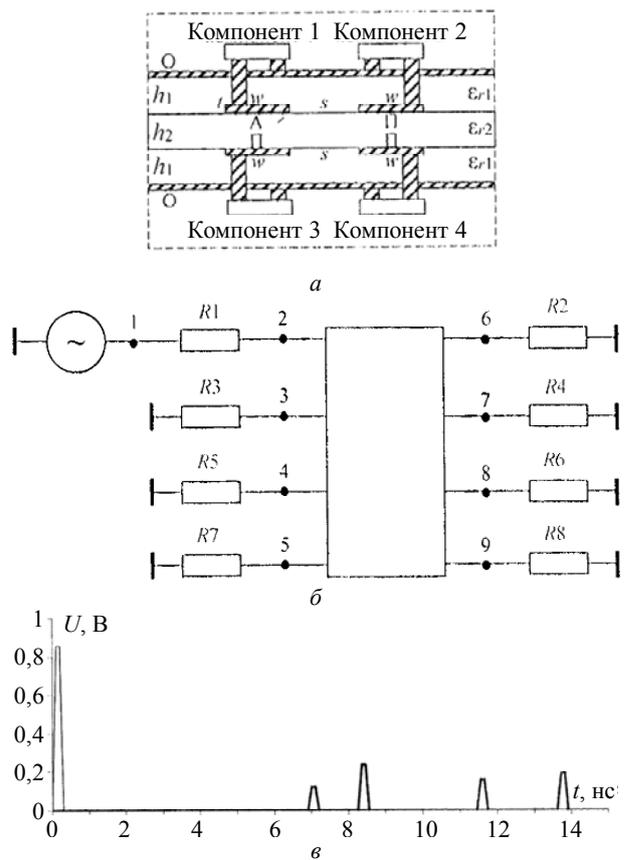


Рис. 3. Поперечное сечение (а), схема моделирования (б) и вычисленные напряжения в начале (тонкий) и конце (жирный) активного проводника при воздействии СКИ с амплитудой ЭДС 2 В (в) для аналога (3-кратное резервирование на основе МПП) предлагаемого способа [8]

Первый из 6 упоминавшихся способов [2] позволяет реализацию на основе обычной ДПП (рис. 4, а). Это достигается за счет выполнения сигнальных полосок в вырезках двух сплошных проводящих слоев. Моделирование распространения СКИ с амплитудой ЭДС 2 В показало (рис. 4, в) амплитуду напряжения на выходе около 0,5 В за счет модального разложения СКИ на два импульса меньшей амплитуды [2]. Таким образом, реализация способа возможна на основе обычной ДПП, но его недостатки состоят в том, что ослабление СКИ составляет не 4, а 2 раза, и возможно не 3-кратное, а лишь 1-кратное резервирование.

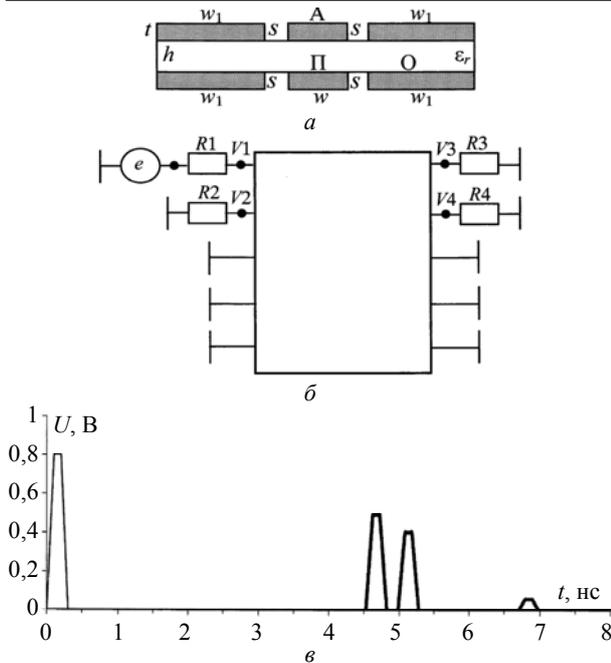


Рис. 4. Поперечное сечение (а), схема моделирования (б) и вычисленные напряжения в начале (тонкий) и конце (жирный) активного проводника при воздействии СКИ с амплитудой ЭДС 2 В (в) для аналога (1-кратное резервирование на основе ДПП) предлагаемого способа [2]

Описание нового способа

После пояснения работы, достоинств и недостатков двух рассмотренных аналогов очевидна возможность создания нового способа (рис. 5, а). Действительно, можно предложить способ резервирования цепей, включающий компоновку и трассировку резервируемой и резервной цепей такую, что для резервируемой цепи они выполняются на верхнем слое подложки, сигнальные проводники выполняются за счет зазоров в опорной проводящей пластине, а для резервной цепи выполняются на нижнем слое подложки зеркально верхнему слою, резервируемые и резервные сигнальные проводники одноименных цепей располагаются друг под другом, а оставшиеся проводники электрически соединяются друг с другом, отличающийся тем, что каждый сигнальный проводник делится посредством зазора на два одинаковых сигнальных проводника. Таким образом, четыре одноименные цепи прокладываются парами параллельно друг другу на верхнем и нижнем слоях, причем они расположены зеркально относительно уже двух плоскостей, так что в качестве резервируемого проводника может выступать любой из четырех проводников, а другие три проводника будут для него резервными. Очевидно, что этот способ реализуем на обычной ДПП.

Моделирование для аналогов описано выше очень кратко (поскольку детали доступны в описаниях патентов), а для нового способа оно описывается подробнее. Моделировалось распространение СКИ с амплитудой ЭДС 2 В с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс в структуре длиной 1 м (рис. 5, б). Геометрические параметры

проводников: $w = 0,185$ мм, $w_1 = 100$ мм, $s = 0,315$ мм, $d = 0,630$ мм, $t = 0,035$ мм. Толщина диэлектрической подложки $h = 0,5$ мм; диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 4,5$. Номинал резисторов $R1-R8$ взят равным (132 Ом) диагональным значениям (они одинаковы в силу зеркальной симметрии по двум плоскостям) матрицы импедансов Z . При моделировании опорным проводником полагался один из 4 крайних проводников, тогда как 3 остальных полагались соединенными с ним на концах.

СКИ подавался между резервируемым проводником (А) и одним из опорных (О). Функцию резервных проводников выполняют пассивные (П). Результаты квазистатического моделирования в системе TALGAT [9] временного отклика на ближнем и дальнем концах резервируемого проводника (точки $V1$ и $V5$ на рис. 5, б) показывают импульсы разложения с амплитудами около 0,25 В, т.е. ослабление 4 раза (рис. 5, в).

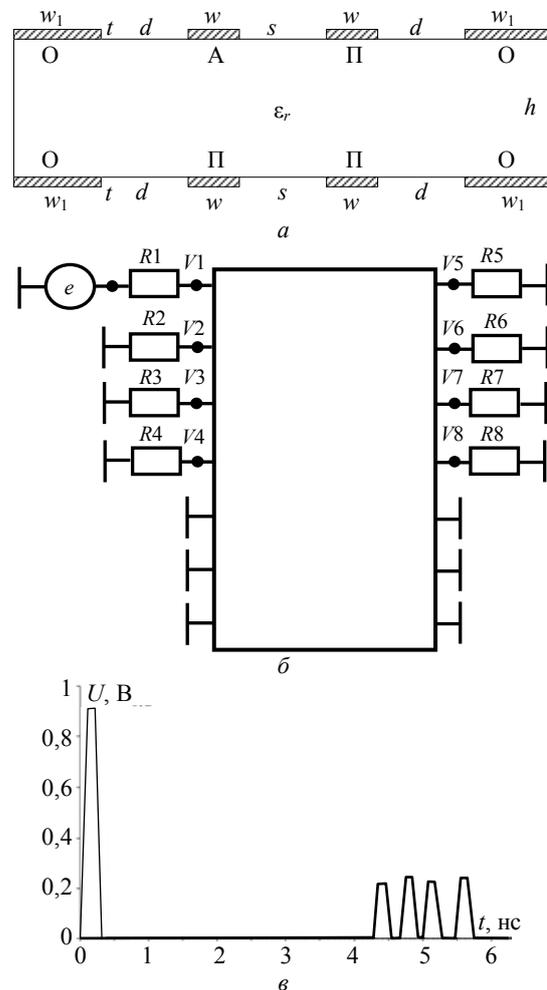


Рис. 5. Поперечное сечение (а), схема моделирования (б) и вычисленные напряжения в начале (тонкий) и конце (жирный) активного проводника при воздействии СКИ с амплитудой ЭДС 2 В (в) для предлагаемого способа (3-кратное резервирование на основе ДПП)

Заключение

Для повышения надежности и помехозащищенности РЭА предложен новый способ 3-кратного ре-

резервирования, отличающийся использованием электромагнитной связи между резервируемым и резервными межсоединениями, зеркальной симметрии поперечного сечения результирующей структуры и лишь 2-слойной конструкции. Приведено поперечное сечение варианта ДПП, реализующей предлагаемый способ. Выполнено моделирование распространения СКИ по межсоединению ДПП, показавшее ослабление 4 раза за счет модального разложения. Таким образом, при реализации предлагаемого способа каждое межсоединение любой из четырёх схем становится защитным устройством, ослабляющим СКИ. При выходе из строя межсоединения или компонента одной из схем питание подается на другую, но в силу зеркальности по двум осям поперечного сечения структуры для каждого межсоединения, ситуация не меняется, работа продолжается.

В перспективе предполагается запатентовать этот способ. Кроме того, целесообразно выполнить более точное и детальное моделирование и структурно-параметрическую оптимизацию ряда конкретных устройств на его основе. Это можно выполнить, используя подход из работы [10]. Учитывая упоминавшуюся зеркальность предлагаемой структуры по двум осям, весьма полезной может оказаться и обстоятельная работа по использованию зеркальной симметрии для совершенствования защиты от сверхкоротких импульсов [11]. Если считать основной причиной для резервирования выход из строя именно компонентов на концах межсоединений, то полезно исследование влияния граничных условий на модальное разложение, подобно выполненному в работе [12]. Если же понадобится оценить влияние на модальную фильтрацию разрыва самого межсоединения, то это можно сделать, используя результаты работы [13]. Наконец, для реализации модального резервирования на практике полезны результаты основных исследований по модальной фильтрации, собранные в монографии [14], и самых свежих – в учебном пособии [15].

При создании новых способов защиты критичной РЭА важно как можно быстрее и шире представить результаты, которые помогут уменьшить вероятность её отказа, поскольку это жизненно важно для общества. Чтобы в короткие сроки исследовать предложенный способ и получить предварительные результаты, применено компьютерное моделирование, позволившее без больших материальных и временных затрат выполнить первые оценки и показать достижимость технического результата без проведения натурального эксперимента, подготовка которого материально затратна и занимает много времени. Между тем в перспективе, естественно, предполагается изготовить макет оптимизированного устройства и выполнить экспериментальное подтверждение характеристик, полученных при моделировании.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00424) в ТУСУРе.

Авторы благодарны рецензенту за ряд ценных замечаний, способствовавших улучшению статьи.

Литература

1. Новый способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, А.М. Заболоцкий, Е.Н. Буичкин // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 – С. 129–131.
2. Пат. 2603843 РФ, МПК H04B 15/00. Способ резервирования для печатных плат / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015137547/07; заявл. 02.09.15, опубл. 10.12.16. Бюл. № 34. – 3 с.
3. Пат. 2603848 РФ, МПК H04B 15/00. Способ резервирования плоских кабелей / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015156667/07; заявл. 28.12.15, опубл. 10.12.16. Бюл. № 34. – 3 с.
4. Пат. 2603850 РФ, МПК H04B 15/02. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015129253/07; заявл. 16.07.15, опубл. 10.12.16. Бюл. № 34. – 3 с.
5. Пат. 2603851 РФ, МПК H04B 15/00. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015129263/07; заявл. 16.07.15, опубл. 10.12.16. Бюл. № 34. – 3 с.
6. Пат. 2614156 РФ, МПК H04B 15/00, H03N 3/00, H05K 3/36. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015137532/07; заявл. 02.09.15, опубл. 23.03.17. Бюл. № 9. – 3 с.
7. Пат. 2624637 РФ МПК H04B 15/02. Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов, О.М. Кузнецова-Таджибаева, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, Е.Н. Буичкин. – № 2015137548/07; заявл. 02.09.15, опубл. 05.07.17. Бюл. № 19. – 3 с.
8. Пат. 2663230 РФ МПК H 04B 15/02. Способ трехкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов. – № 2017113045/07; заявл. 14.04.2017, опубл. 02.08.2018. Бюл. № 22. – 3 с.
9. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.
10. Gazizov T.R. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations / T.R. Gazizov, I.Ye. Sagiyeva, S.P. Kuksenko // Complexity – 2019. – P. 11. <https://doi.org/10.1155/2019/6301326>.
11. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses / E.B. Chernikova, A.O. Belousov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. MDPI AG. – 2019. – Vol. 11, № 7. – P. 883. <https://doi.org/10.3390/sym11070883>.
12. Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // 2015 Int. Sib. Conf. Control Commun. – 2015. – 3 p. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147024>.
13. Orlov P.E. Contactless modal phenomena based approach to detecting, identifying, and diagnosing of electrical -

connections / P.E. Orlov, T.R. Gazizov // Complexity. – 2018. – 12 p. <https://doi.org/10.1155/2018/5081684>.

14. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: ТУСУР, 2013. – 151 с.

15. Заболоцкий А.М. Электромагнитная совместимость: модальные технологии: учеб. пособие / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: ТУСУР, 2018. – 132 с.

Шарафутдинов Виталий Расимович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-878-89-68
Эл. почта: dovod@bk.ru

Газизов Тальгат Рашитович

Зав. каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-826-07-24
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R.

New method for triple reservation of interconnects

The problem of increasing the reliability and noise protection of radioelectronic equipment is solved. The possibility of using the reservation the equipment interconnects for increasing not only the reliability, but also the noise protection at the expense of modal decomposition phenomenon is considered. To implement it, the new method of triple reservation is proposed. That method distinguishes by using the electromagnetic coupling between reserved and reserving interconnects, the reflection symmetry of resulting structure cross section and only two-layer construction. A cross section of printed circuit board option, implementing the proposed method, is presented. An ultrashort pulse propagation along the board interconnect is simulated. Decreasing the pulse amplitude by factor 4 caused by modal decomposition is shown.

Keywords: reservation, interconnects, printed circuit boards, modal decomposition, ultrashort pulse, reflection symmetry.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-26-30

References

1. Gazizov T.R., Orlov P.E., Zabolotsky A.M., Buichkin E.N. New method of routing of the printed conductors of redundant circuits, *Proceedings of TUSUR University*, 2015, № 3, pp. 129–131 (in Russ.).

2. Gazizov T.R., Orlov P.E., SHarafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.M., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob rezervirovaniia dlia peshatnih plat* [Reservation method for printed circuit boards]. Patent RF, no. 2603843, 2016).

3. Gazizov T.R., Orlov P.E., SHarafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.M., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob rezervirovaniia ploskih cablei* [Method of flat cables backing up]. Patent RF, no. 2603848, 2016).

4. Gazizov T.R., Orlov P.E., SHarafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.M., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob trassirovki peshatnih provodnikov chepei s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors of circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2603850, 2016).

5. Gazizov T.R., Orlov P.E., SHarafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.M., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P.,

Buichkin E.N. *Sposob trassirovki peshatnih provodnikov s dopolnitelnim dielektrikom dlia cepei s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors with additional dielectric for circuits with redundancy]. Patent RF, no. 2603851, 2016).

6. Gazizov T.R., Orlov P.E., SHarafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.M., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob kompanovki peshatnih plat dlia cepei s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent RF, no. 2614156, 2017).

7. Gazizov T.R., Orlov P.E., SHarafutdinov V.R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O.M., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P., Buichkin E.N. *Sposob vnutrennei kompanovki peshatnih plat dlia cepei s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent RF, no. 2624637, 2017).

8. Gazizov T.R., Orlov P.E., SHarafutdinov V.R. *Sposob trehkratnogo rezervirovaniia cepei v mnogosloinnykh peshatnih platah* [Method of circuit triple reservation in multilayered printed circuit boards]. Patent RF, no. 2663230, 2017).

9. Kuksenko S.P., Zabolotsky A.M., Melkozerov A.M., Gazizov T.R., New features of electromagnetic compatibility in TALGAT simulation software, *Doklady TUSUR*, 2015, № 2, pp. 45–50 (in Russ.).

10. Gazizov T.R., Sagiyeva I.Ye., Kuksenko S.P. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations, *Complexity*, 2019, 11 p. <https://doi.org/10.1155/2019/6301326>.

11. Chernikova E.B., Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses, *Symmetry*. MDPI AG, 2019, Vol. 11, № 7, 883 p. <https://doi.org/10.3390/sym11070883>.

12. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. UWB pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions, 2015 Int. Sib. Conf. Control Commun, 2015, 3 p. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147024>.

13. Orlov P.E., Gazizov T.R. Contactless modal phenomena based approach to detecting, identifying, and diagnosing of electrical connections, *Complexity*, 2018, 12 p. <https://doi.org/10.1155/2018/5081684>.

14. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Modal filters for protection of spaceborne radioelectronic equipment, Tomsk: Tomsk state university of control systems and radioelectronics, 2013, 151 p. (in Russ.).

15. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Electromagnetic compatibility: modal technologies: workbook, Tomsk: Tomsk state university of control systems and radioelectronics, 2018, 132 p. (in Russ.).

Vitaly R. Sharafutdinov

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-878-89-68
Email: dovod@bk.ru

Talgat R. Gazizov

Chief of Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-826-07-24
Email: talgat@tu.tusur.ru

УДК 621.371.32

Р.Р. Хажибеков

Исследование амплитудно-частотных характеристик модальных фильтров с пассивным проводником в виде последовательности отрезков линий передачи

Рассматривается возможность увеличения крутизны спада амплитудно-частотной характеристики модального фильтра путем увеличения количества отрезков линий передачи, составляющих пассивный проводник. С помощью электродинамического анализа выполнено исследование амплитудно-частотных характеристик модальных фильтров на основе полосковых линий с лицевой связью и модального фильтра со встречно-штыревой структурой проводников. Возможность увеличения крутизны спада амплитудно-частотной характеристики и ширины полосы пропускания также подтверждается натурным экспериментом. Показано, что кроме улучшения частотных характеристик последовательное соединение двух модальных фильтров улучшает подавление сверхкороткого импульса.

Ключевые слова: модальный фильтр, амплитудно-частотная характеристика, печатная плата, элементы с распределенными параметрами.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-31-36

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) весьма актуальна, поскольку РЭА восприимчива к влиянию электромагнитных помех (ЭМП). Кроме того, чтобы вывести из строя РЭА или ухудшить её функционирование, используются преднамеренные ЭМП. Одним из наиболее опасных преднамеренных воздействий является сверхкороткий импульс (СКИ) [1–4]. Исследования отечественных и зарубежных ученых показали уязвимость РЭА к СКИ. Он имеет широкий спектр, перекрывающий большую часть диапазонов работы РЭА, а из-за малой длительности импульса основная энергия генератора расходуется на увеличение амплитуды СКИ, что приводит к значительному повышению напряженности электрического поля.

Для защиты аппаратуры от кондуктивных ЭМП широко применяют разрядники, варисторы, TVS-диоды или гальваническую трансформаторную развязку. Для защиты от СКИ предложены модальные фильтры (МФ), в которых не используются радиоэлектронные компоненты, а применяются особые структуры, способствующие разложению СКИ на импульсы меньшей амплитуды.

Многочисленные исследования показали способность МФ эффективно подавлять СКИ [5–10]. Однако для применения МФ в системах передачи информации необходимо улучшать частотные характеристики устройства, такие как ширина полосы пропускания и величина затухания в полосе пропускания. Одновременное улучшение этих характеристик возможно путем обеспечения более крутого спада на частотной зависимости $|S_{21}|$. Кроме того, решение данной задачи позволит улучшить подавление СКИ [11].

Известно, что одним из возможных решений по увеличению крутизны спада частотной зависимости $|S_{21}|$ фильтров является добавление дополнительных звеньев [12, 13]. Применительно к МФ предлагается разделить пассивный проводник на последователь-

ность отрезков линий передачи (ОЛП) [14]. Управление величиной емкости или индуктивности таких ОЛП возможно при включении их концов в короткозамкнутом или разомкнутом режимах [15]. Так, для ОЛП, включенного в начале в режиме короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ) в конце, при его длине $l \ll \lambda/4$ происходит сильное возрастание последовательной индуктивности, а при увеличении длины ОЛП от $\lambda/4$ возрастает последовательная емкость.

Поэтому целью работы является исследование возможности увеличения крутизны спада АЧХ МФ путем разделения пассивного проводника на ОЛП.

Модальный фильтр на основе полосковых линий с лицевой связью

Рассматривается структура МФ на основе полосковых линий с лицевой связью [16], в которой среднее геометрическое волновых сопротивлений четной и нечетной мод равно 50 Ом. Поперечное сечение структуры представлено на рис. 1. МФ содержит 3 проводника – активный (А), пассивный (П) и опорный (О). Значения геометрических параметров следующие: ширина проводника $w = 5,5$ мм, расстояние между проводниками $s = 2$ мм, толщина проводника $t = 0,105$ мм, толщина подложки из стеклотекстолита $h = 0,79$ мм. Относительная диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита (ϵ_r) равна 5, а тангенс угла диэлектрических потерь – 0,035 на частоте 1 МГц.

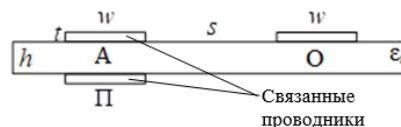


Рис. 1. Поперечное сечение МФ на основе полосковых линий с лицевой связью

Рассмотрены структуры с числом ОЛП пассивного проводника $N = 1, 3, 5, 7$. Длина каждого ОЛП выбиралась одинаковой (l/N), где $l = 1$ м. Поэтому

при изменении значения N изменялось значение l . Пассивный проводник включался в режиме КЗ–ХХ. Активный проводник включался в режиме 50 Ом ($R_1 = R_2 = 50$ Ом). Схема включения МФ представлена на рис. 2.

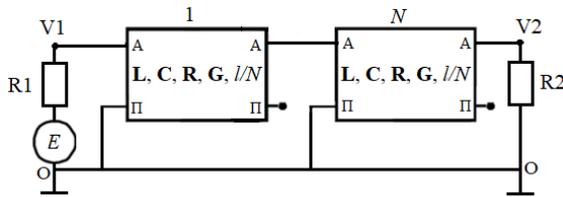


Рис. 2. Схема включения МФ на основе полосковых линий с лицевой связью с различным числом ОЛП пассивного проводника

Вычислены частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ с помощью электродинамического анализа. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Как видно из графиков, с увеличением N увеличиваются крутизна частотной зависимости $|S_{21}|$ и ширина полосы пропускания. Кроме того, увеличиваются ширина полосы подавления и величина вносимого затухания в полосе подавления. В табл. 1 представлены значения первой частоты среза для $N = 1, 3, 5, 7$. Из полученных значений можно сделать вывод, что при увеличении числа N и сохранении общей длины проводников МФ частота среза увеличивается приблизительно в N раз

$$f_{cpN} \approx N \cdot f_{cp1}, \quad (1)$$

где f_{cpN} – частота среза МФ с количеством ОЛП пассивного проводника N , f_{cp1} – частота среза МФ с пассивным проводником в виде одного отрезка ОЛП.

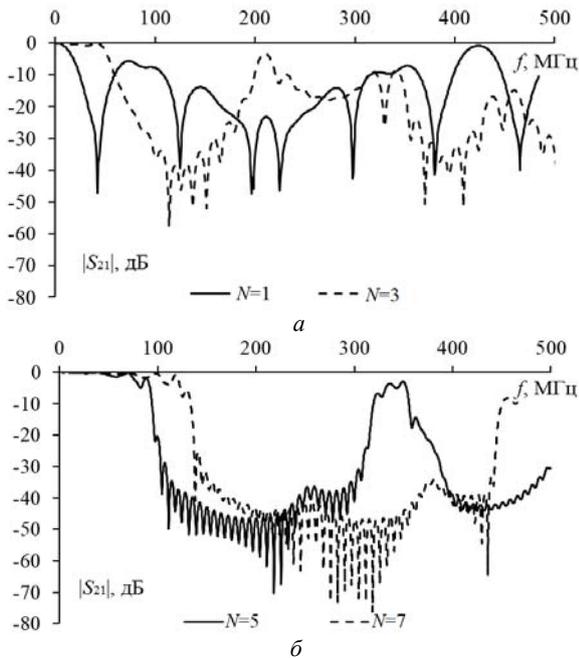


Рис. 3. Вычисленные частотные зависимости МФ на основе полосковых линий с лицевой связью с различным числом N

Выражение (1) не может принять вид равенства из-за пульсаций и искажений в полосе пропускания,

которые отчасти вызваны неоднородностями структуры. К ним можно отнести разрывы и КЗ пассивного проводника (учитываются в трехмерном электродинамическом моделировании).

Таблица 1

Зависимость частоты среза от значения N (результаты электродинамического анализа)

Количество ОЛП пассивного проводника, N	1	3	5	7
Длина одного ОЛП пассивного проводника, мм	1000	333	200	143
f_{cp} , МГц	15	51	78	106

Модальный фильтр со встречно-штыревой структурой проводников

Вычислены частотные зависимости $|S_{21}|$ встречно-штыревого МФ с числом ОЛП пассивного проводника $N = 1$ и $N = 3$ [17]. Схема включения МФ показана на рис. 4. Пассивный проводник включался в режиме КЗ–ХХ, а активный – в режиме 100 Ом. Длина самого длинного ОЛП пассивного проводника выбиралась как половина длины всего МФ ($l_2 = l/2$), длина первого и третьего ОЛП выбиралась как половина длины второго ОЛП ($l_1 = l_3 = l_2/2$). Однако так как переходные отверстия могут располагаться только на внешней стороне полувитков, длины ОЛП получились равными: $l_1 = 67$ мм, $l_2 = 159$ мм, $l_3 = 74$ мм. Размеры макетов одинаковы. Поперечное сечение структур показано на рис. 5, а, а вид сверху на топологию проводников – на рис. 5, б. Значения геометрических параметров следующие: $w = 0,18$ мм, $s = 0,38$ мм, $t = 0,105$ мм, $h = 0,29$ мм. Длина штырей lp составляет 1,4 мм. Материал подложки – FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$).

Внешний вид топологии макетов сверху (Top) и снизу (Bottom) представлен в табл. 2. Вычисленные частотные зависимости $|S_{21}|$ приведены на рис. 6. Из графиков видно, что при $N = 3$ крутизна $|S_{21}|$ значительно выше, чем при $N = 1$. Кроме того, полоса пропускания при $N = 1$ равна 59 МГц, а при $N = 3$ – 161 МГц.

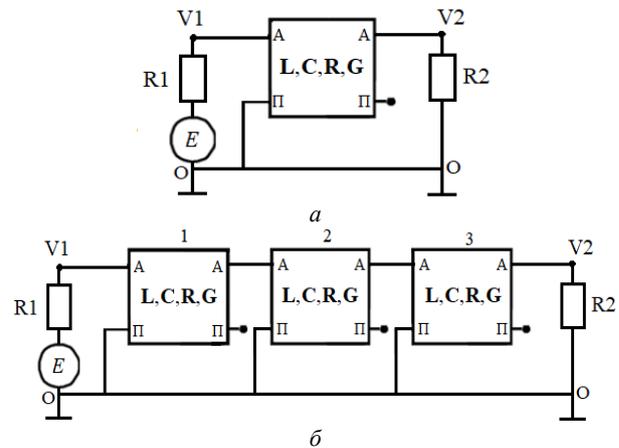


Рис. 4. Схема включения МФ со встречно-штыревой структурой проводников для числа отрезков ОЛП пассивного проводника $N = 1$ (а) и $N = 3$ (б)

Таблица 2

Топология МФ со встречно-штыревой структурой проводников

N=1		N=3	
Top	Bottom	Top	Bottom

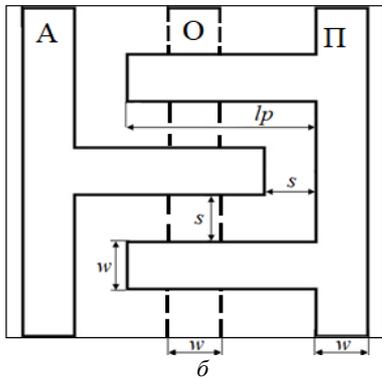
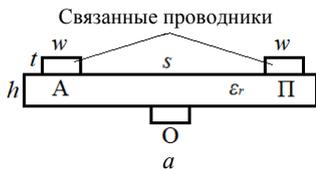


Рис. 5. Поперечное сечение (а) и вид сверху (б) МФ со встречно-штыревой структурой проводников (активный и пассивный проводники на верхнем слое, опорный – на нижнем)

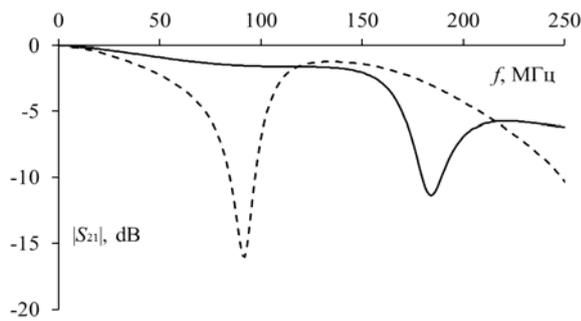


Рис. 6. Вычисленные частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ со встречно-штыревой структурой проводников при $N=1$ (---) и $N=3$ (—)

Экспериментальные исследования

Изготовлен прототип печатной платы МФ на основе полосковых линий с лицевой связью с числом ОЛП пассивного проводника $N = 1, 2, 3, 5, 7$. Общая длина МФ составляет 280 мм. Структура выполнена из недорогого материала и имеет значения геометрических параметров: $w = 9$ мм, $s = 2$ мм, $h = 1,5$ мм и $t = 0,018$ мм. Поперечное сечение и схема включения представлены на рис. 7. Измеренные с помощью прибора Р2М-40 частотные зависимости $|S_{21}|$ показаны на рис. 8. Видно, что с увеличением N крутизна частотной зависимости $|S_{21}|$ и значения первой частоты среза увеличиваются. Однако возникают пульсации в полосе пропускания. Кроме того, на результаты измерений могут влиять соединители, пайка, а также неоднородности на стыках. В табл. 3 приведены значения первой частоты среза при разных N .

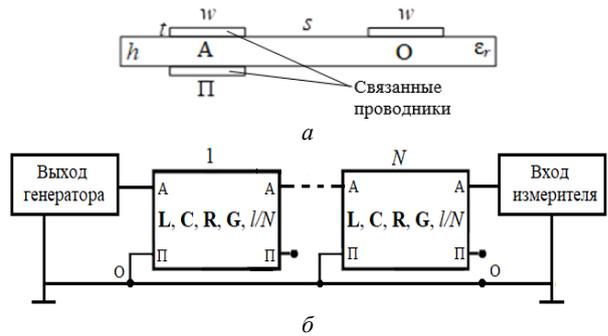


Рис. 7. МФ на основе полосковых линий с лицевой связью: поперечное сечение (а) и схема соединения с измерительной установкой (б)

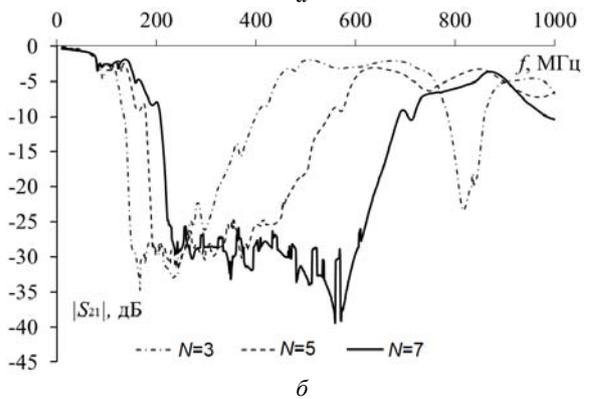
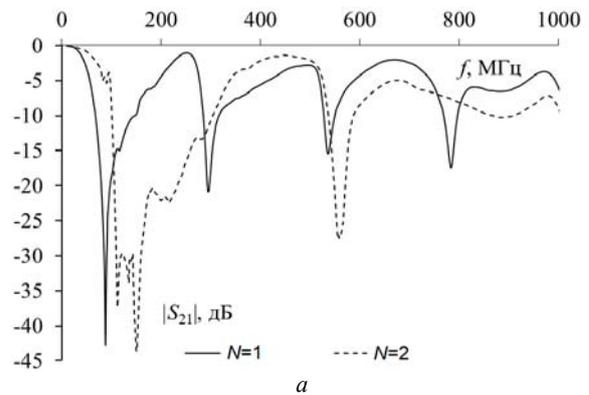


Рис. 8. Измеренные частотные зависимости МФ на основе полосковых линий с лицевой связью

Таблица 3
Зависимость первой частоты среза МФ
на основе полосковых линий с лицевой связью от N
(результаты измерений)

Количество ОЛП, N	1	2	3	5	7
Длина ОЛП, мм	280	140	93,3	56	40
$f_{\text{ср}}$, МГц	49	76	116	139	150

Выполнено измерение частотной зависимости $|S_{21}|$ двух последовательно включенных МФ на основе полосковых линий с лицевой связью прибором P2M-40 (рис. 9). Этот МФ в другом исполнении и имеет значения геометрических параметров: $w = 5,5$ мм, $s = 2$ мм, $t = 0,105$ мм, $h = 0,79$ мм. Длина одного МФ составляет 0,276 м. Пассивный проводник включался в режиме КЗ–ХХ. Частотные зависимости $|S_{21}|$ для одного МФ и для двух последовательно соединенных МФ приведены на рис. 10. Из графика видно, что при добавлении второго МФ полоса пропускания увеличилась с 60 до 66 МГц, несмотря на общее увеличение длины проводников в 2 раза. В то же время резонансная частота уменьшилась со 145 до 115 МГц.

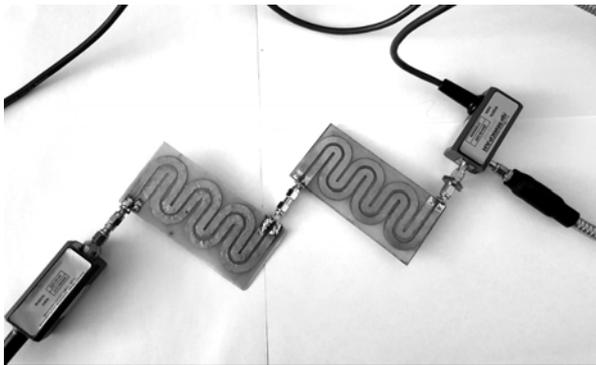


Рис. 9. Соединение двух МФ

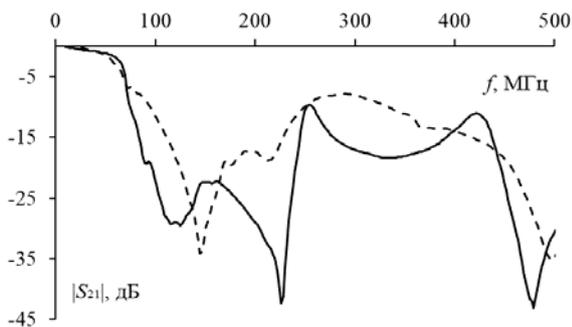


Рис. 10. Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ одного МФ (---) и двух последовательно соединенных МФ (—)

Последовательное соединение двух МФ может обеспечивать не только лучшую частотную характеристику, чем один МФ, но значительно улучшить подавление СКИ. Это подтверждается измеренными формами напряжения на входе осциллографа С9-11 при воздействии СКИ длительностью 0,45 нс (рис. 11) и их сравнением с результатами измерения для одного МФ. Из результатов измерения получено, что при прохождении одного МФ СКИ ослабляется в 5,7 раза, а двух – в 21 раз.

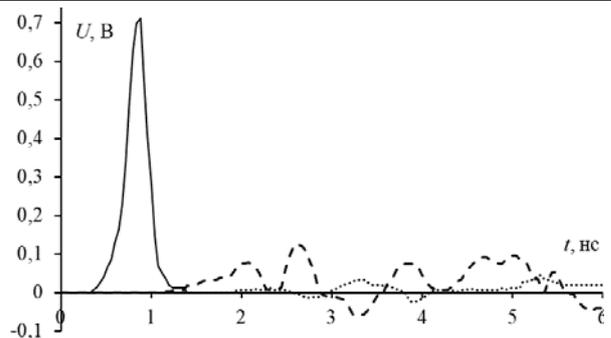


Рис. 11. Формы напряжения на входе осциллографа С9-11 при воздействии СКИ без МФ (—), с одним МФ (- -) и с двумя МФ (···)

Заключение

В работе исследовано влияние изменения количества отрезков ОЛП пассивного проводника МФ на частотную зависимость $|S_{21}|$. С помощью электродинамического анализа вычислены частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ на основе полосковых линий с лицевой связью с числом ОЛП пассивного проводника $N = 1, 2, 3, 5, 7$. Результаты моделирования показали, что с увеличением N увеличиваются крутизна спада частотной зависимости $|S_{21}|$ и ширина полосы пропускания. Кроме того, увеличивается величина вносимого затухания вне полосы пропускания. Выполнено измерение частотной зависимости $|S_{21}|$ одного МФ и двух последовательно включенных МФ на основе полосковых линий с лицевой связью. Результаты измерения показали, что при добавлении второго МФ полоса пропускания увеличилась с 60 до 66 МГц, несмотря на общее увеличение длины проводников в 2 раза. В то же время частота резонанса уменьшилась с 145 до 115 МГц. Также экспериментально показано, что при подключении второго МФ можно значительно улучшить подавление СКИ. Так, при прохождении одного МФ СКИ ослабляется в 5,7 раза, а двух – в 21 раз. Изготовлен прототип печатной платы МФ на основе полосковых линий с лицевой связью с числом ОЛП пассивного проводника $N = 1, 2, 3, 5, 7$. Измерены частотные зависимости $|S_{21}|$ с помощью P2M-40. Показано, что с увеличением N крутизна спада частотной $|S_{21}|$ и частота среза увеличиваются. Однако возникают пульсации в полосе пропускания.

Таким образом, рекомендуется использовать МФ с делением пассивного проводника на ОЛП для улучшения подавления высокочастотных помех и уменьшения искажений полезного сигнала, что может быть наиболее полезно для защиты оборудования вычислительных сетей.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-365.2018.8.

Литература

1. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – 2014. – No. 41 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ece-research.unm.edu/summa/notes/SDAN/0041.pdf>, свободный (дата обращения: 24.03.2019).

2. Zabolotsky A.M. Dangerous pulse excitation of coupled lines / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov, A.G. Bova, W.A. Radasky // Proc. of the 17-th Int. Zurich Symp. on EMC. Singapore, February 27 – March 3, 2006. – P. 164–167.

3. Vass S. Defense against electromagnetic pulse weapons // *Aarms*. – 2004. – Vol. 3, No. 3. – P. 443–457.

4. Gaynutdinov R. Immunity research of the electronic systems elements at the influence of intentional ultrashort electromagnetic pulses / R. Gaynutdinov, S. Chermoshentsev // 17th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016. – P. 214–218.

5. Gazizov A.T. UWB pulse decomposition in simple printed structures / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 1136–1142.

6. Zabolotsky A.M. Simulation of ultrawide band pulse propagation in asymmetrical modal filter for power network protection / A.M. Zabolotsky, A.T. Gazizov // *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. – 2015. – Vol. 9. – P. 68–74.

7. Газизов А.Т. Сравнение результатов измерения и моделирования временного отклика модального фильтра на воздействие сверхкороткого импульса // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 4(38). – С. 149–152.

8. Заболоцкий А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 41–44.

9. Gazizov T.R. Design of printed modal filters for computer network protection / T.R. Gazizov, I.E. Samotin, A.O. Melkozerov, A.M. Zabolotsky // Proc. of 30-th Int. conf. on lightning protection. Italy, Cagliari, 13–17 September 2010. – P. 1246-1–1246-3.

10. Хажибеков Р.Р. Моделирование модального фильтра с учетом потерь / Р.Р. Хажибеков, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Сибирский журнал науки и технологий. – 2018. – № 1. – С. 44–48.

11. Заболоцкий А.М. Электромагнитная совместимость: модальные технологии: учеб. пособие / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2018. – 132 с.

12. Horowitz P. The Art of Electronics, 3rd edition / P. Horowitz, W. Hill. – Cambridge University Press, 2015. – 1219 p.

13. Matthaei G. Microwave Filters, Impedance Matching Networks, And Coupling Structures / G. Matthaei, E. Jones, L. Young. – BookMart Press, NJ, USA. – 1985. – 1095 p.

14. Соломоник И.Ш. Малогабаритная печатная длинная линия с равномерно распределенными параметрами // Тр. ТИРиЭТА. – 1972. – Вып. 7.

15. Изюмов Н.М. Основы радиотехники. / Н.М. Изюмов, Д.П. Линде. – М.: Энергия, 1965. – 544 с.

16. Gazizov A. UWB pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions / A. Gazizov, A. Zabolotsky // 2015 Int. Sib. Conf. Control Commun. – Omsk (Russia), May 21–23, 2015. – P. 1–3.

17. Khazhibekov R.R. Modal filter with interdigital structure of conductors for 100 Mbit/s Ethernet equipment protection / R.R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 18–20 April 2019. – P. 1–4.

Khazhibekov R.R.

Study of the amplitude-frequency characteristics of modal filters with a passive conductor in the form of a series of transmission line segments

The possibility of increasing the gain slope of the modal filter by increasing the number of segments of transmission lines that make up the passive conductor is considered. An electrodynamic analysis was used to study the gain of modal filters based on strip lines with a broadside coupling and a modal filter with an interdigital structure of conductors. The possibility of increasing the gain slope and bandwidth is also confirmed by the field experiment. It is shown that in addition to improving the frequency characteristics, the successive combination of two modal filters improves the suppression of an ultrashort pulse.

Keywords: modal filter, amplitude-frequency response, printed circuit board, elements with distributed parameters.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-31-36

References

1. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources. *System and assessment notes*, 2014, Note 41. Available at: <http://ece-research.unm.edu/summa/notes/SDAN/0041.pdf> (Accessed: March 22, 2019).

2. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R., Bova A.G., Radasky W.A. Dangerous pulse excitation of coupled lines. *Proc. of the 17-th Int. Zurich Symp. on EMC, Systems and Signal Processing*, February 27–March 3, 2006, P. 164–167.

3. Vass S. Defense against electromagnetic pulse weapons. *Aarms*, 2004, vol. 3, no. 3, pp. 443–457.

4. Gaynutdinov R, Chermoshentsev S. Immunity research of the electronic systems elements at the influence of intentional ultrashort electromagnetic pulses. *17th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016*, pp. 214–218.

5. 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.

6. Zabolotsky A.M., Gazizov A.T. Simulation of ultrawide band pulse propagation in asymmetrical modal filter for power network protection. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2015, vol. 9, pp. 68–74.

7. Gazizov A.T. [Comparison of measurement results and simulation of the temporal response of the modal filter to the excitation of an ultrashort pulse]. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, no. 4(38), pp. 149–152 (in Russ.).

8. Zabolotsky A.M. [Using reflection symmetry to improve modal filtering]. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, no 2 (36), pp. 41–44 (in Russ.).

9. Gazizov T.R. Samotin I.E., Melkozerov A.O., Zabolotsky A.M. Design of printed modal filters for computer network protection. *Proc. of 30-th Int. conf. on lightning protection*, Italy, Cagliari, 13–17 September 2010, P. 1246-1–1246-3.

10. Khazhibekov R.R., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. [Modal filter simulation with losses]. *Sibirskii zhurnal nauki i tekhnologii*, 2018, No 1, P. 44–48 (in Russ.).

11. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. *Elektromagnitnaya sovместimost': modal'nye tekhnologii: ucheb. posobie [Electromagnetic compatibility: modal technology: stud. tutorial]*. Tomsk, TUSUR publ., 2018, 132 p.

12. Horowitz P., Hill W. *The Art of Electronics, 3rd edition*, Cambridge University Press, 2015, 1219 p.

Хажибеков Роман Русланович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 43-14-39

Эл. почта: r300994@mail.ru

13. Matthaei G., Jones E., Young L. *Microwave Filters, Impedance Matching Networks, And Coupling Structures*, BookMart Press, NJ, USA, 1985, 1095 p.

14. Solomonik I.Sh. [Compact print line with uniformly distributed parameters]. *Tr. TIRiETA*, 1972, Vol 7 (in Russ.).

15. Izyumov N.M., Linde D.P. *Osnovy radiotekhniki* [Radio engineering basics], Moscow, Energy publ., 1965, 544 p.

16. Gazizov A., Zabolotsky A. UWB pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions. *2015 Int. Sib. Conf. Control Commun*, Omsk (Russia), May 21–23, 2015, pp. 1–3.

17. Khazhibekov R.R., Zabolotsky A.M. Modal filter with interdigital structure of conductors for 100 Mbit/s

Ethernet equipment protection. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 18–20 April 2019, pp. 1–4.

Roman R. Khazhibekov

Post-graduate student, Department of Television and Control
Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics
(TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7 (382-2) 43-14-39

Email: r300994@mail.ru

УДК 621.3.088.6

Г.М. Шевченко, Э.В. Семенов

Уменьшение погрешности измерения времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов при использовании осциллографов с узкой полосой пропускания

Рассмотрено воздействие осциллографа на фронты импульса тока обратного восстановления быстровосстанавливающегося диода. Установлено, что при разных длительностях фронта обратного напряжения и полосы пропускания осциллографа на переднем фронте семейства кривых тока обратного восстановления диода имеется точка пересечения, численно равная полусумме прямого тока и максимального тока восстановления (ток короткого замыкания). С помощью модели осциллографа оценено его влияние на вторую отсчетную точку времени обратного восстановления, расположенную на экспоненциальной части импульса тока. Предложенный способ коррекции экспоненциальной части импульса тока обратного восстановления быстровосстанавливающегося диода совместно с выбором первой отсчетной точки позволяет уменьшить погрешность измерения времени обратного восстановления при использовании осциллографов с узкой полосой пропускания. Время обратного восстановления диода, полученное на осциллографах Rigol DS6064 и Agilent DSO9254A, расходитя на 1,7%, что в 4 раза меньше по сравнению со стандартным методом.

Ключевые слова: полупроводниковый диод, обратный ток диода, измерение времени обратного восстановления, переходная характеристика осциллографа, измерительный тракт.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-37-41

Явление обратного восстановления диода является одним из ключевых процессов, протекающих в диоде, которое необходимо учитывать при реализации устройства. Процесс обратного восстановления диода способен вызвать аномалии в работе схемы. Например, может являться инициатором самоподдерживающихся квазипериодических колебаний, возрастания выходного напряжения схемы или вывести транзистор из строя в схеме непосредственно преобразователя повышающего типа [1–4] и т.д. Природа возникновения этого явления вызвана тем, что при переходе из прямого смещения в обратное в диоде начинает протекать заряд обратного восстановления, т.е. электроны должны вернуться в *n*-область, а дырки – в *p*-область, тогда они могут рекомбинировать на аноде и катоде соответственно. Время, за которое происходит переход из прямого смещения диода в обратное, называется временем обратного восстановления $t_{\text{вос}}$ [5–7].

Существует стандарт [8], который регламентирует требования к процессу измерения времени обратного восстановления диода. В соответствии с ним длительность переходной характеристики осциллографа должна быть не более $0,2t_{\text{вос}}$. Эта граница по большей части предназначена для фиксации быстрого переднего фронта импульса тока обратного восстановления диода, нежели для более медленной экспоненциальной части. Осциллографы с длительностью фронта переходной характеристики менее 400 пс имеют очень высокую стоимость, что делает процесс измерения времени дорогостоящим и долгим из-за их производственной загруженности. Использование низкочастотных осциллографов увеличивает погрешность измерения и искажает как передний, так и задний фронт импульса обратного тока восстановления диода.

Цель работы заключается в уменьшении погрешности измерения времени обратного восстановления диода при использовании осциллографов с узкой полосой.

Метод измерения времени обратного восстановления диода

В качестве объекта исследования используется диод 2Д510 производства АО «НИИПП». Его паспортное время обратного восстановления составляет 2 нс [9]. Ток обратного восстановления диода 2Д510 содержит два фронта: первый имеет быстрый отклик, а второй – более затяжной экспоненциальный (рис. 1).

Измерение времени восстановления $t_{\text{вос}}$ (см. рис. 1, пунктирная линия) в соответствии со стандартом [8] приводит к систематической погрешности измерения, так как к действительному времени восстановления добавляется половина длительности фронта импульса обратного напряжения.

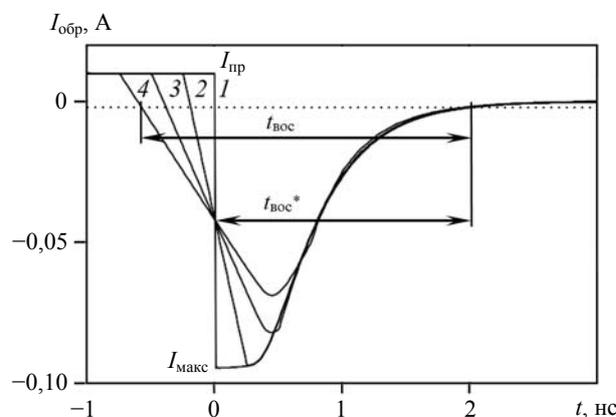


Рис. 1. Ток обратного восстановления диода 2Д510. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют длительности фронта 0; 0,5; 1; 1,5 нс

При выборе начала отсчета времени восстановления будем руководствоваться правилом, описанным в статье [10]. Положение первой отсчетной точки при разной длительности фронта обратного напряжения (см. рис. 1) и полосы пропускания осциллографа определяется как полусумма прямого тока $I_{пр}$ и максимального тока восстановления $I_{макс}$. Вторая точка отсчета будет использоваться на уровне -2 мА.

Моделирование экспоненциальной части обратного тока диода

Модель осциллографа, учитывающая его влияние на экспоненциальную часть импульса тока обратного восстановления диода, описывается следующей импульсной характеристикой:

$$h(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right). \quad (1)$$

До моделирования целесообразно провести оценку постоянной времени экспоненциальной части на реальном отклике диода. Экспоненциальная часть импульса тока описывается

$$i(t) = I_{обр.макс} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (2)$$

Логарифмируя левую и правую часть (2), получим

$$\tau(t) = \frac{-t}{\ln(i(t))}. \quad (3)$$

Используя (2), построим график зависимости постоянной времени экспоненциального фронта обратного тока диода от времени (рис. 2).

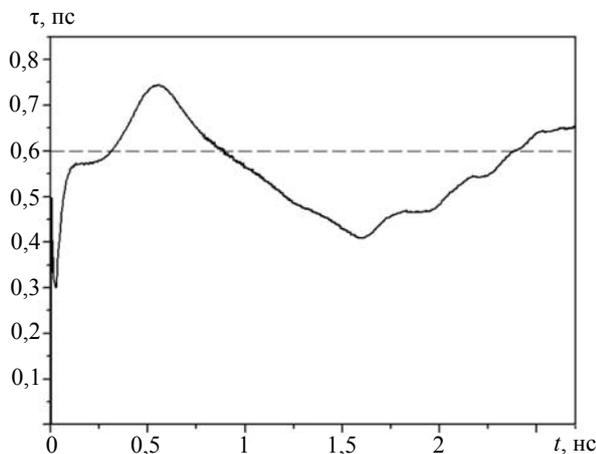


Рис. 2. Зависимость постоянной времени экспоненциального фронта обратного тока диода от времени

Среднее значение постоянной времени на рис. 2 составило 0,6 нс. На рис. 3 представлен идеальный (кривая 1) и реальный экспоненциальный фронт обратного тока диода (кривая 2).

Идеальный экспоненциальный фронт пропускается через модель осциллографа с разными постоянными времени. Данный прием позволяет сравнивать осциллографы относительно постоянной времени экспоненциального фронта диода. Рисунок 4 иллюстрирует результаты моделирования обратного

тока диода в зависимости от постоянной времени импульсной характеристики осциллографа (длительности фронта переходной характеристики осциллографа).

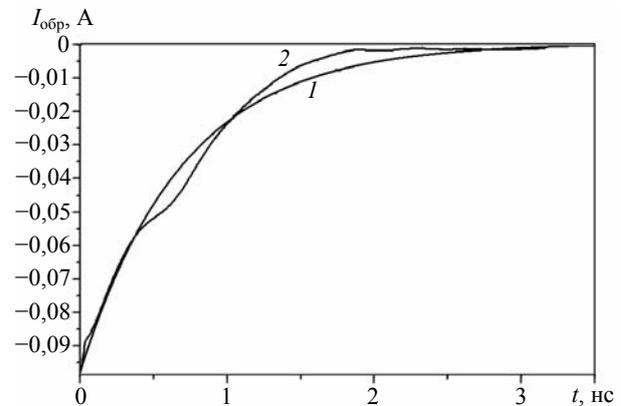


Рис. 3. Экспоненциальный фронт обратного тока диода. Кривые 1 и 2 соответствуют идеальному и реальному фронту

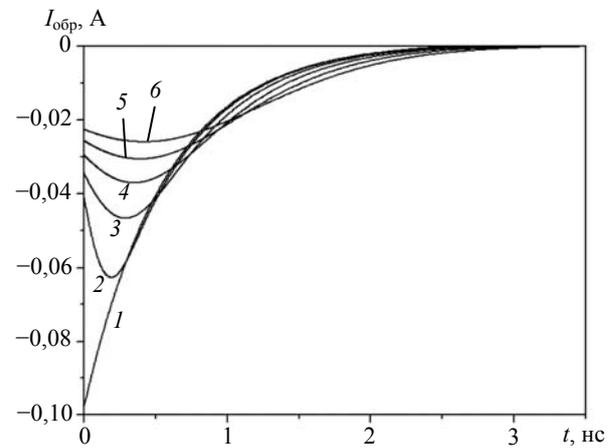


Рис. 4. Семейство кривых экспоненциальной части обратного тока диода. Кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют постоянным времени 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 нс

Из рис. 4 видно, что при увеличении постоянной времени импульсной характеристики осциллографа происходит уменьшение амплитуды обратного тока диода. Кроме этого, происходит смещение экспоненциальной части вправо относительно нулевого воздействия на нее, вследствие чего происходит увеличение измеренного времени обратного восстановления (по уровню -2 мА).

На рис. 5 приведена зависимость относительной погрешности измерения времени обратного восстановления диода от длительности переходной характеристики осциллографа.

При увеличении постоянной времени (см. рис. 5) наблюдается возрастание относительной погрешности измерения. То есть при уменьшении полосы пропускания осциллографа происходит увеличение погрешности измерения. Например, для осциллографа Rigol DS6064 с полосой пропускания 600 МГц [11] и длительностью фронта переходной характеристики 0,6 нс относительная погрешность составляет 9,8%, а для Agilent DSO9254A с полосой

пропускания 2500 МГц [12] и длительностью фронта переходной характеристики 0,14 нс равна 1,2%. Стоит отметить, что относительная погрешность осциллографа с длительностью фронта переходной характеристики 0,6 нс ($0,3t_{\text{вос}}$) удовлетворяет стандарту [8], но при этом сам осциллограф не соответствует условию $0,2t_{\text{вос}}$ того же стандарта.

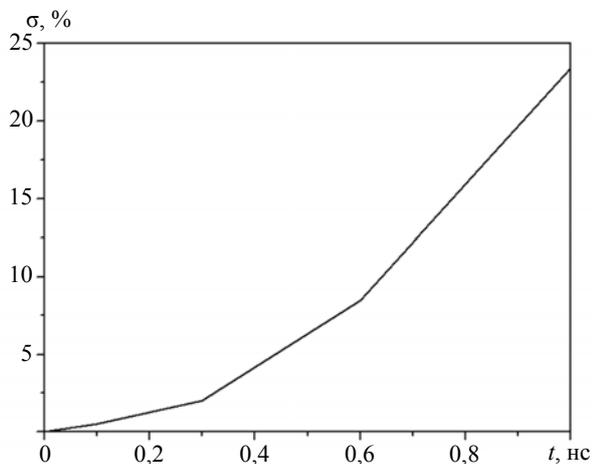


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности измерения времени обратного восстановления диода от длительности переходной характеристики осциллографа

Эксперимент и его анализ

Рисунок 6 иллюстрирует блок-схему экспериментальной установки. Установка включает в себя формирователь пикосекундных импульсов [15], обратное напряжение которого подается на исследуемый диод VD. Далее на осциллографе фиксируется сигнал импульса тока обратного восстановления диода. R1 и R2 являются согласованными нагрузками (50 Ом) формирователя и осциллографа соответственно.

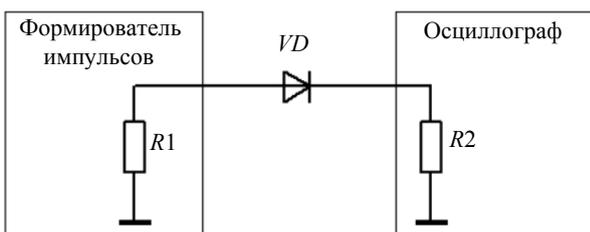


Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки

На рис. 7 показаны кривые обратного тока диода 2Д510, полученные в ходе измерения с помощью Rigol DS6064 и Agilent DSO9254A. Кривые восстановления на рис. 6 расположены в соответствии с правилом выбора первой отсчетной точки, описанным в статье [10].

Расхождение между временами на рис. 7 составило 6,6%. Осциллограф Rigol DS6064 существенно искажает экспоненциальную часть импульса обратного тока диода. Для достижения цели работы решено провести коррекцию экспоненциальной части.

Коррекция сигнала обратного тока диода происходит с помощью трансверсального фильтра, реа-

лизованного в среде графического программирования LabVIEW. Трансверсальный фильтр включает в себя многоотводную линию задержки, выходной сигнал которого получается в результате суммирования задержанных τ и взвешенных C входных сигналов [13–14].

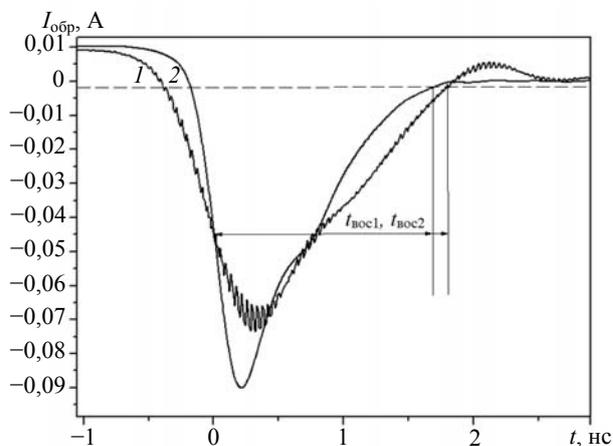


Рис. 7. Ток обратного восстановления диода 2Д510. Кривые 1 и 2 соответствуют осциллограммам Rigol DS6064 и Agilent DSO9254A

Настройка трансверсального фильтра происходит при калибровке измерительного тракта следующим образом: на вход фильтра подается сигнал с формирователя импульсов (рис. 8, кривая 1) [15]. Далее происходит варьирование коэффициентов фильтра (таблица) с целью минимизирования осцилляций на нижней плоской вершине обратного напряжения (см. рис. 8, кривая 2).

Коэффициенты трансверсального фильтра

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5
340p	10p	40p	170p	290p
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
0,3	4	-0,4	0,4	-0,04
τ_6	τ_7	τ_8	τ_9	
310p	70p	300p	625p	
C_6	C_7	C_8	C_9	
-0,1	-0,2	-0,16	-0,1	

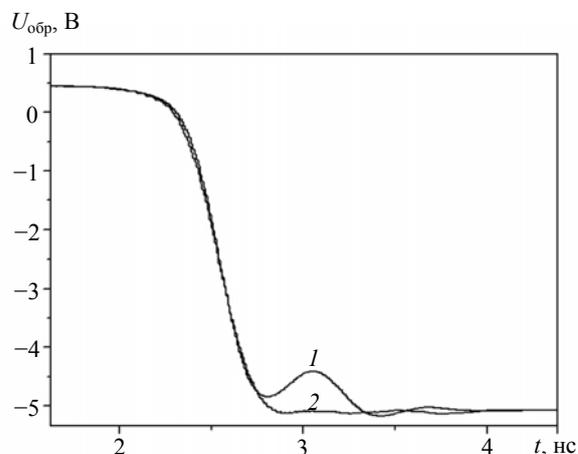


Рис. 8. Обратное напряжение формирователя. Кривые 1 и 2 соответствуют сигналам на входе и выходе фильтра

Данный подход позволяет до определенной степени (в пределах погрешности реализации трансверсальным фильтром корректирующей функции) скомпенсировать влияние измерительного тракта от формирователя пикосекундных импульсов и до входного усилителя осциллографа.

Далее были пропущены импульсы тока обратного восстановления диода 2Д510, полученные с помощью Rigol DS6064 и Agilent DSO9254A, через трансверсальный фильтр и получены кривые обратного тока диода, представленные на рис. 9.

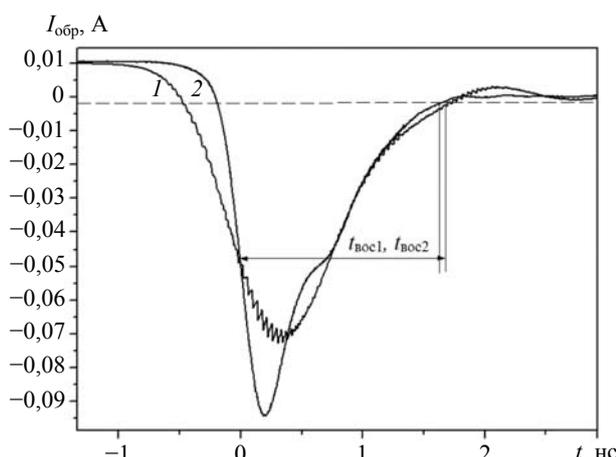


Рис. 9. Ток обратного восстановления диода 2Д510 после коррекции. Кривые 1 и 2 соответствуют осциллограммам Rigol DS6064 и Agilent DSO9254A

Рисунок 9 иллюстрирует результативность проведённой коррекции обратного тока диода. Из рис. 9 видно, что экспоненциальная часть обратного тока диода, полученного с помощью Rigol DS6064, близка по форме с сигналом, полученным с помощью Agilent DSO9254A. Расхождение между $t_{\text{вос}}$ составило 1,7%. С помощью коррекции удалось снизить расхождения во временах в 4 раза. Это позволяет использовать осциллографы с узкой полосой пропускания. При этом будет получаться близкое по значению время, как и с помощью высокочастотного осциллографа.

Заключение

Показано повышение метрологического качества измерения времени обратного восстановления при использовании узкополосных осциллографов посредством выбора начальной отсчетной точки и коррекции экспоненциального фронта импульса тока обратного восстановления диода. Предложенная коррекция экспоненциальной части импульса тока обратного восстановления диода позволяет совместно с правилом выбора первой отсчетной точки [10] уменьшить расхождение во временах, полученных на низкочастотном и высокочастотном осциллографах. Эксперимент показал, что применение осциллографа с длительностью фронта переходной характеристики $0,3t_{\text{вос}}$ позволяет получать близкое по значению время обратного восстановления, как при длительности фронта переходной характеристики $0,2t_{\text{вос}}$, оговоренной в стандарте [8]. При этом по-

грешность измерения составляет 1,7%, что меньше в 4 раза по сравнению со стандартным методом.

Литература

1. Karadzinov L.V. Analysis of the Influence of Diode Reverse Recovery on the Operation and Design of High-Frequency Rectifiers / L.V. Karadzinov, D.C. Hamill // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – Vol. 15, No. 2. – P. 386–398. DOI: 10.1109/63.838112
2. Deane J.H.B. Instability, subharmonics, and chaos in power electronic systems / J.H.B. Deane, D.C. Hamill // IEEE Trans. Power Electron. – 1991. – Vol. 5, No. 2. – P. 260–268. DOI: 10.1109/63.56516
3. Simple piecewise-linear diode model for transient behavior / L.V. Karadzinov, D.J. Jefferies, G.L. Arsov, J.H.B. Deane // Int. J. Electron. – 1996. – Vol. 78, No. 1. – P. 143–160. DOI: 10.1080/00207219508926148
4. Arsov G.L. Influence of the circuit parameters on the DH phenomenon / G.L. Arsov, L.V. Karadzinov // 8th Symp. Power Electron. – 1995. – Vol. 1, No. 1. – P. 253–258. DOI: 10.1109/PESC.2001.954036
5. Троян П.Е. Твердотельная электроника: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2006. – 321 с
6. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
7. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 463 с.
8. ГОСТ 18986.8–73. Диоды полупроводниковые. Метод измерения времени обратного восстановления. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1973 – 5 с.
9. Сайт компании АО «НИИПП». Диоды импульсные 2Д510А/НТ, 2Д510А9/НТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.niipp.ru/catalog/detail.php?ID=239>, свободный (дата обращения: 15.05.2019).
10. Семенов Э.В. Уменьшение погрешности измерения времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов / Э.В. Семенов, О.Ю. Малаховский // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2018): матер. 28-й Междунар. Крым. конф. – Севастополь: Вебер, 2018. – С. 1269–1273.
11. Сайт компании Rigol. Осциллограф Rigol DS6064 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rigol.su/index.php?route=product/product&product_id=136, свободный (дата обращения: 15.05.2019).
12. Сайт компании Keysight Technologies. Осциллограф DSO9254A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Infinium_prog_guide.pdf, свободный (дата обращения: 15.05.2019).
13. Богнер Р. Введение в цифровую фильтрацию. – М.: Мир, 1976. – 276 с.
14. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Советское радио, 1980. – 224 с.
15. Шевченко Г.М. Измерение времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – 2018. – Т. 7. – С. 201–204.

Шевченко Глеб Михайлович

Магистрант каф. промышленной электроники (ПрЭ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-960-976-19-91
Эл. почта: gleb95@inbox.ru

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС) ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-909-391-11-76
Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Shevchenko G.M., Semyonov E.V.

Reducing the measurement error of the time of the return recovery of rapidly recovering diodes using oscilloscopes with a narrow bandwidth

The effect of an oscilloscope on the fronts of a current pulse of a reverse recovery of a rapidly recovering diode is considered. It is established that at different durations of the reverse voltage front and oscilloscope bandwidth, at the leading edge of the family of reverse diode recovery current curves, there is an intersection point that is numerically equal to the sum of the forward current and maximum recovery current (short circuit current). Using an oscilloscope model, its effect on the second reference point of the reverse recovery time, located on the exponential part of the current pulse, is estimated. The proposed method for correcting the exponential part of the current pulse of the reverse recovery of a fast recovery diode, together with the choice of the first reference point, allows to reduce the measurement error of the reverse recovery time when using oscillographs with a narrow bandwidth. The reverse recovery time of the diode, obtained on an Rigol DS6064 and Agilent DSO9254A oscilloscopes, diverges by 1,7%, which is 4 times less than the standard method.

Keywords: semiconductor diode, reverse diode current, reverse recovery time measurement, oscilloscope transient response, measuring path.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-37-41

References

1. Karadzinov L.V., Hamill D.C. Analysis of the Influence of Diode Reverse Recovery on the Operation and Design of High-Frequency Rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 386–398. doi: 10.1109/63.838112
2. Deane J.H.B., Hamill D.C. Instability, subharmonics, and chaos in power electronic systems. *IEEE Trans. Power Electron*, 1991, vol. 5, no. 2, pp. 260–268. doi: 10.1109/63.56516
3. Karadzinov L.V., Jefferies D.J., Arsov G.L., Deane J.H.B. Simple piecewise-linear diode model for transient behavior. *Int. J. Electron*, 1996, vol. 78, no. 1, pp. 143–160. doi: 10.1080/00207219508926148
4. Arsov G.L., Karadzinov L.V. Influence of the circuit parameters on the DH phenomenon. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1995, vol. 1, no. 1, pp. 253–258. doi: 10.1109/PESC.2001.954036.
5. Troyan P.E. *Tverdotel'naya elektronika: Uchebnoe posobie* [Solid State Electronics: A Tutorial]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2006. 321 p. (in Russ.).

6. Tugov N.M., Glebov B.A., Charykov N.A. *Poluprovodnikovye pribory* [Semiconductor devices]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1990. 576 p. (in Russ.).

7. Starosel'skij V.I. *Fizika poluprovodnikovyh priborov* [Physics of semiconductor devices]. Ljubercy, Jurajt Publ., 2016. 463 p. (in Russ.).

8. GOST 18986.8-73. Semiconductor diodes. The method of measuring the reverse recovery time. Moscow, Standartinform Publ., 1973. 5 p. (in Russ.).

9. Website of corporation «NIIPP». Pulse diodes 2Д510А/HT. Available at: <https://www.niipp.ru/catalog/detail.php?ID=239>, free (Accessed: May 15, 2019).

10. Semenov E.V., Malahovskij O.Ju. Umen'shenie pogreshnosti izmerenija vremeni obratnogo vosstanovlenija bystrovosstanavlivajushhihsja diodov [Reducing the measurement error of the recovery time of rapidly recovering diodes]. SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii (KryMiKo '2018): Materialy 28-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii [Microwave equipment and telecommunication technologies (KryMiKo 2018)]. Proc. materials of the 28th International Crimean Conference]. Sevastopol, Weber Publ., 2018. pp. 1269–1273. (in Russ.).

11. Website of corporation Rigol. Oscilloscope Rigol DS6064. Available at: http://rigol.ru/index.php?route=product/product&product_id=136, free (Accessed: May 15, 2019).

12. Website of corporation Keysight Technologies. Oscilloscope DSO9254A. Available at: https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Infiniium_prog_guide.pdf, free (Accessed: May 15, 2019).

13. Bogner R. *Vvedenie v cifrovuju fil'traciju* [Introduction to digital filtering]. Moscow, MIR Publ., 1976. 276 p.

14. Hemming R.V. *Cifrovye fil'try* [Digital filters]. Moscow, Soviet radio Publ., 1982. 224 p. (in Russ.).

15. Shevchenko G.M. Measurement of the recovery time of rapidly recovering diodes. International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. *Perspective of fundamental Sciences development*, 2018, vol. 7, pp. 201–204. (in Russ.).

Gleb M. Shevchenko

Graduate student Department Industrial Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-960-976-1991
Email: gleb95@inbox.ru

Edward V. Semyonov

Doctor of Engineering, Professor, Department Radio Electronics and Communication Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-909-539-11-76
Email: edwardsemyonov@narod.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

УДК 004.056.53

Е.А. Басыня, В.Е. Хиценко, А.А. Рудковский

Метод идентификации киберпреступников, использующих инструменты сетевого анализа информационных систем с применением технологий анонимизации

Представлен анализ современных подходов хакеров к проведению кибератак, подробно описана одна из стратегий исследования объекта атаки с использованием комбинирования виртуальных защищенных каналов связи, средств анонимизации, включая оверлейные технологии и сети. Предложен оригинальный метод противодействия подобным несанкционированным воздействиям. Научная новизна работы заключается в идентификации злоумышленников (осуществляющих активный сбор данных с применением технологий анонимизации) посредством составления векторов атаки на основе ряда параметров: принадлежности адресного пространства к сети анонимизации, исчерпания пула адресного пространства (личностей) сети анонимизации, типа активного/пассивного исследования, хода выполнения типа исследования, корреляции параметров с привносимыми искусственными задержками и др. Выносимый на обзор метод идентификации злоумышленников, использующих инструменты автоматизированного активного и пассивного анализа трафика и информационных систем с применением технологий анонимизации, используется совместно с авторским модулем фальсификации операционных систем и функционирующих на них сервисов/служб в широком спектре вариаций для различных хакеров, что позволяет успешно дезинформировать злоумышленника на первом этапе проведения кибератаки. Программная реализация авторского метода была успешно протестирована, экспериментально исследована и апробирована. Целевой областью применения выступают серверные решения, функционирующие на основе стека протоколов TCP/IP.

Ключевые слова: анонимизация, оверлейные сети, сканирование, зондирование, дезинформация.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-45-51

Автоматизация информационных процессов всех сфер общественной деятельности не только выступает катализатором их развития, но и порождает широкий спектр уязвимостей, которые могут быть использованы для проведения кибератак. Лишь на критическую информационную инфраструктуру Российской Федерации в прошлом году было совершено более 4,3 миллиарда кибератак согласно данным Национального координационного центра по компьютерным инцидентам [1]. Последствия успешного взлома информационной системы и сети проявляются в существенных экономических и политических издержках. В качестве примера стоит привести кражу биткоинов на \$120 млн у криптовалютной биржи Youbit, кражу конфиденциальных данных (от идентификаторов социального страхования до номеров кредитных карт) 145 млн клиентов крупного кредитного агентства Equifax [2].

Проблематика информационной безопасности заключается в несовершенстве стека протоколов TCP/IP и уязвимостях программного обеспечения (ПО): от операционных систем до прикладных утилит. С течением времени быстро нарастает актуальность обеспечения сетевой информационной безопасности.

Для достижения этой цели телекоммуникационными компаниями и научным сообществом разрабатываются различные программные и аппаратно-программные решения. Стоит отметить, что одновременно и киберпреступники совершенствуют свой инструментарий и методики: от этапа первичного сбора информации об объекте исследования до его успешного взлома или вывода из состояния доступ-

ности. Данное противостояние не имеет устойчивого баланса.

Для ограничения и блокировки сбора информации о системе со стороны неавторизованного объекта разрабатываются различные методы противодействия сетевому сканированию: от реализации скрытых каналов исследования до использования подхода к идентификации аномалий [3–5]. Но данные методы не дают однозначного результата в случае применения киберпреступником комбинирования оверлейных технологий и различных средств анонимизации.

В данной работе будут проанализированы современные подходы хакеров к пассивному и активному анализу информационных систем и сетей, а также предложен оригинальный метод противодействия внешним злоумышленным возмущениям.

Постановка задачи

Целью данной работы являлись разработка, исследование и программная реализация метода идентификации злоумышленников, использующих инструменты автоматизированного активного и пассивного анализа трафика и информационных систем в последовательном режиме с применением технологий анонимизации. Данный метод используется в авторском модуле фальсификации операционных систем и функционирующих на них сервисов/служб в широком спектре вариаций для различных хакеров [6, 7]. Определенный сфальсифицированный снимок программного обеспечения предоставляется конкретному идентифицированному хакеру, несмотря на его попытки анонимизации. Полноценное дезинформирование хакера выступает качественным ин-

инструментом защиты и позволяет отследить дальнейшие (ответные) действия злоумышленника.

Анализ существующих стратегий проведения кибератак

С целью извлечения экономической и политической выгоды преступное сообщество прибегает к несанкционированному доступу к информационным ресурсам, организует взлом и вывод объектов из состояния доступности. Для решения поставленных задач разрабатываются различные стратегии проведения кибератак. Одним из первых и ключевых этапов любого плана злоумышленника выступает сбор информации о целевой системе или сети как в техническом, так и в организационном аспекте. Фактически разведка позволяет определить топологию и структуру вычислительной сети, используемые аппаратно-программные решения, их архитектуру и уязвимости. На данном этапе применяются механизмы пассивного и активного анализа трафика и информационных ресурсов.

Этот этап представляет собой пассивную аккумуляцию информации и рекогносцировку с целью получения данных, относящихся к целевым объектам, без непосредственного участия самих объектов. Примером таких инструментов являются снифферы (перехватчики и сетевые анализаторы трафика), а также системы OSINT (англ. open source intelligence – разведка на основе открытых источников) [8].

Активный метод предполагает взаимодействие с целевой системой во время сбора информации. На этой основе функционируют инструменты сканирования, пентестинга (тестирование на проникновение) и зондирования. При сканировании исследуют открытые TCP- и UDP-порты, определяют функционирующие на ней сервисы и службы, распознают тип операционной системы. Пентестинг используется для оценки безопасности систем путем имитации атаки. В ходе зондирования имитируются различные атаки и отслеживается реакция объекта с идентификацией эшелонов его защиты и формируются рекомендации по взлому защиты.

Наиболее распространенный элемент стратегии проведения кибератак – сканирование портов [9]. Существующие системы обнаружения и предотвращения вторжений легко блокируют подобные внешние возмущения, если с одного IP-адреса производится подключение к двум и более портам. С данной задачей справляются даже антивирусные средства.

Более эффективным методом несанкционированного исследования информационных систем является вертикальное распределенное сканирование [10], позволяющее задействовать множество IP-адресов для сканирования большого диапазона портов на одной целевой системе. Этот метод позволяет злоумышленнику минимизировать вероятность его обнаружения, а также исключает возможности существующих средств защиты для блокировки атакующего.

Не все угрозы, исходящие от злоумышленников, можно считать одинаково опасными. Некоторые из

них являются просто малозначительными неприятностями, другие потенциально угрожают развитию и существованию организации. В наиболее разрушительных угрозах можно выделить три важных показателя:

- скорость исполнения;
- интенсивность;
- неожиданность.

Скорость и интенсивность – это технические преимущества, для которых можно найти ответные решения. Если сетевая инфраструктура предприятия имеет комплексный контроль информационной безопасности, то возможно отразить быстрые и агрессивные атаки. Однако в случае постобработки или привнесения задержек системами защиты атака может достичь цели. При этом важно однозначно идентифицировать злоумышленника даже при сканировании защищенных систем [11, 12].

Совокупность применяемых алгоритмов и методов несанкционированного исследования и взлома информационных систем в сочетании с используемыми программными решениями позволяет ввести следующую классификацию злоумышленников по уровню квалификации:

- начального уровня;
- среднего уровня;
- высокого уровня.

Злоумышленники начального уровня не имеют практического опыта, атакуют с одного IP-адреса, своевременно идентифицируются и блокируются современными средствами обеспечения безопасности: системами обнаружения и предотвращения вторжения, межсетевыми экранами и антивирусными программами. При проведении подобных атак используется программное обеспечение, которое представлено в свободном доступе, присутствует во всех базах знаний систем защиты, как и эксплуатируемые известные уязвимости. Таких злоумышленников легко деанонимизировать, так как они прикладывают минимум усилий для сокрытия своей локации.

Злоумышленники среднего уровня квалификации задействуют расширенные методы сканирования портов: от низкочастотного по производительности сканирования SYN-пакетами до сессионного взаимодействия прикладными протоколами. В дополнение атакующие используют прокси-серверы и технологии виртуальных защищенных каналов связи (например, VPN – англ. virtual private network) для обхода систем защиты и сокрытия своего реального месторасположения. Деанонимизация подобных хакеров также не составляет труда для глобального наблюдателя, способного на уровне интернет-провайдера производить описанное ниже исследование связи параметров информационных потоков на основе привнесения задержек.

Злоумышленники высокого уровня квалификации формируют стратегию проведения кибератак с использованием комбинирования виртуальных защищенных каналов связи, средств анонимизации,

оверлейных технологий и сетей. Под оверлейной сетью (англ. Overlay Network) в данном контексте понимается общий случай логической сети, создаваемой поверх Интернета, функционирующего на основе стека протоколов TCP/IP. Узлы оверлейной сети могут быть связаны физическим или логическим соединением, для которого в основной сети существует один или несколько соответствующих маршрутов из физических соединений.

Описанная стратегия проведения кибератаки, позволяющая обойти существующие системы защиты и обеспечить анонимность хакера, представлена на рис. 1.

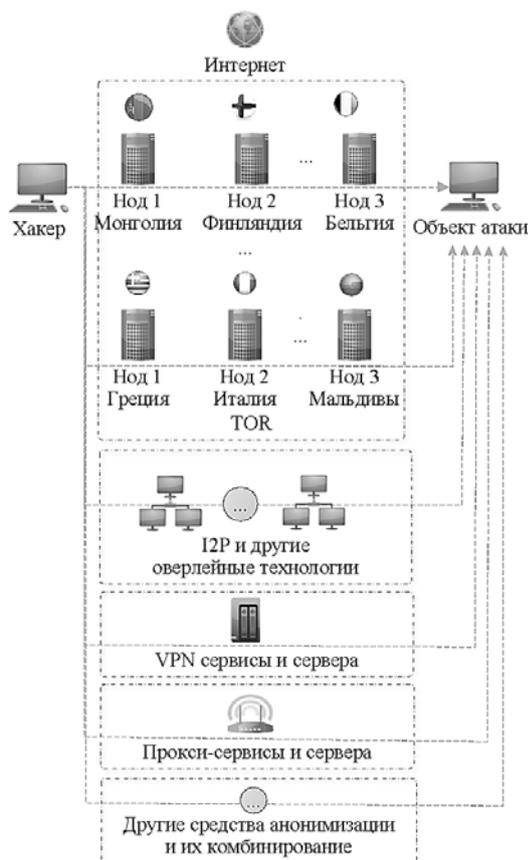


Рис. 1. Стратегия проведения кибератаки

В основе представленной стратегии лежит комбинирование виртуальных защищенных каналов связи, средств анонимизации, оверлейных технологий и сетей. На первом этапе злоумышленник выбирает последовательность использования перечисленных технологий и разворачивает соответствующую программную инфраструктуру. Далее в рамках активного воздействия на объект атаки злоумышленник организует любое атомарное информационное взаимодействие с одного IP-адреса. По окончании данной итерации меняется личность (IP-адрес и сеть в случае исчерпания ресурсов). Данные действия повторяются до окончания несанкционированного исследования информационной системы.

В качестве примера стоит привести последовательность действий при сканировании TCP- и UDP-портов операционной системы жертвы:

- 1) составление последовательности используемых технологий: TOR, I2P+Mixminion, VPN-сервисы, прокси-сервисы;
- 2) развертка программной инфраструктуры стека технологий из первого пункта;
- 3) построение цепочки оверлейной сети TOR;
- 4) сканирование одного порта с одной выходной ноды сети TOR;
- 5) перестроение цепочки оверлейной сети TOR;
- 6) сканирование одного порта с новой выходной ноды сети TOR;
- 7) повторение п. 3–6 до исчерпания IP-адресов выходных нод сети TOR;
- 8) смена пула адресного пространства на сети I2P+Mixminion и повторение действий, аналогичных п. 3–7;
- 9) смена пула адресного пространства на сервисы VPN и повторение действий, аналогичных п. 3–7;
- 10) смена пула адресного пространства на прокси-сервисы и повторение действий, аналогичных п. 3–7;
- 11) составление отчета о результатах сканирования.

Таким образом, успешно осуществляется анонимное сканирование TCP- и UDP-портов операционной системы жертвы. Подобная комплексная стратегия проведения кибератаки является нетривиальной и ресурсозатратной, а также требует высокого уровня квалификации злоумышленника. Предлагаемый авторами метод идентификации киберпреступников, использующих инструменты сетевого анализа информационных систем с применением технологий анонимизации, может быть применен в качестве механизма защиты от атак подобного рода.

Проблематика атакующей стороны

В настоящее время злоумышленнику достаточно проблематично организовать масштабное сканирование самостоятельно, так как для аренды большого числа серверов требуются серьезные финансовые вложения. Вдобавок к этому необходима верификация пользователя, что еще больше мешает преступнику осуществить свои намерения.

Так, популярные дата-центры и провайдеры при первичном запросе услуги могут потребовать подтверждение личности. Требуются документы, на основании которых можно без затруднений идентифицировать клиента. Интересной практикой является необходимость предоставления фото человека с определенным документом в руках, что позволяет убедиться в подлинности личности субъекта.

С технической точки зрения злоумышленнику осложняют деятельность публичные базы знаний IP-адресов различных сервисов анонимизации, запросы с которых могут отклоняться средствами защиты жертвы по политике DROP (без уведомлений).

К сожалению, любые ограничения могут быть нейтрализованы хакером высокого уровня квалификации.

Проблематика стороны защиты

Стек протоколов TCP/IP изначально не был спроектирован с учетом высоких требований к ин-

формационной безопасности [13]. Даже базовые протоколы и алгоритмы не предусматривают проверки подлинности субъектов взаимодействия.

Несовершенство программного обеспечения позволяет атакующей стороне использовать различные уязвимости системы для проведения атаки.

Другим немаловажным моментом выступает отсутствие единой актуальной базы знаний «подозрительных» IP-адресов. К тому же в силу свободы слова не стоит исключать возможность доступа с этих адресов добропорядочных пользователей.

Принятая жесткая логика поведения средств защиты не только упрощает идентификацию злоумышленником средств защиты жертвы, но и зачастую плохо выстроена. Например, большинство систем обнаружения и предотвращения вторжений начинают сигнализировать о подозрительной сетевой активности лишь при исследовании более двух нестандартных портов с одного IP-адреса.

Технические ограничения существующих систем защиты учитываются злоумышленником при проектировании стратегии атаки. Например, большинство межсетевых экранов для блокировки запросов с различных анонимных сетей ведут черный список, размещенный в пакетном фильтре IPTABLES [14], что замедляет работу системы. Это связано с последовательной обработкой записей от первого правила к последнему. При этом есть ограничения как на количество источников в одном правиле, так и на общее количество правил. Соответственно исключается полноценное противостояние ранее описанной комплексной стратегии проведения профессиональной кибератаки.

Предлагаемое решение

В данной работе предложен оригинальный метод идентификации злоумышленников, использующих инструменты автоматизированного активного и пассивного анализа трафика и информационных систем в последовательном режиме с применением технологий анонимизации (рис. 2).

Рассмотрим работу системы, функционирующей на основе данного метода. Программная часть была спроектирована и реализована с использованием следующего стека технологий: операционная система Alpine Linux, языки программирования Python, C++, фреймворк Flask, СУБД PostgreSQL, системы управления репозиториями и проектами GitLab и Redmine, системы управления виртуальной инфраструктурой разработки: ESXI, Docker, Vagrant, модули оверлейных сетей и др.

На первом этапе работы метода производится синхронизация с публичными списками сетей анонимизации: прокси- и VPN-сервисов.

Далее процесс синхронизации переключается на публичные черные списки IP-адресов [15], причинами внесения в которые являются спам, ботнет, DDOS и иные атаки.

Затем заранее установленное программное обеспечение для доступа к оверлейным технологиям и сетям позволяет, используя внутренние инстру-

менты/интерфейсы, запросить актуальный список IP-адресов всех выходных нодов.

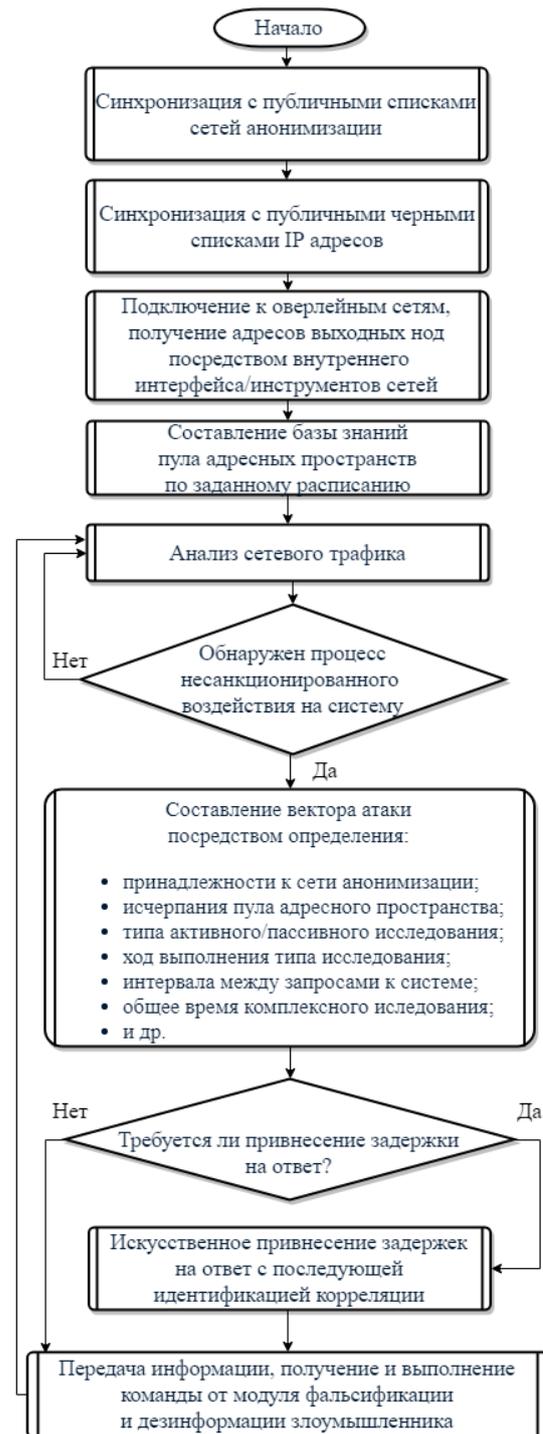


Рис. 2. Блок-схема предлагаемого метода

В результате выполнения описанных действий производится итерационное составление базы знаний пула адресных пространств. Период обновления базы знаний можно устанавливать вручную. Значение по умолчанию – 1 ч. Все базы данных обслуживает локальная система управления базами данных.

С целью идентификации определенного злоумышленника из группы атакующих в онлайн режиме производится мониторинг и анализ сетевого

трафика для выявления информационных потоков по следующим признакам:

- принадлежность адресного пространства к сети анонимизации;
- регистрация исчерпания пула адресного пространства (личностей) сети анонимизации;
- тип активного/пассивного исследования;
- регистрация хода выполнения типа исследования;
- интервал между запросами к системе;
- и др.

Совокупность этих признаков формирует вектор атаки, который позволяет определить хакера за множеством сменяемых личностей.

Для повышения вероятности сопоставления вектора атаки конкретному злоумышленнику используется искусственное привнесение задержек на ответ с последующей идентификацией корреляции.

Стоит отметить, что данный метод используется в авторском модуле фальсификации определенной конфигурации программного обеспечения (операционной системы и функционирующих на ней сервисов/служб) с ориентацией на конкретного хакера, несмотря на использование им технологий анонимизации. Соответственно одним из последних этапов предлагаемого метода является передача информации, получение и выполнение команды от модуля фальсификации и дезинформации злоумышленника.

Обнаружение несанкционированного исследования системы производится стандартными сигнатурными методами. Например, обращение к любому порту, не предоставляющему публичный сервис клиентам, можно считать потенциальным вредоносным возмущением.

В рамках поставленной задачи был сделан акцент на последовательную методику исследования сети/системы злоумышленником. Это связано с анализом накопленной статистики по проводимым комплексным атакам злоумышленниками с использованием и комбинированием средств анонимизации. Большинство автоматизированных средств исследования при перенаправлении трафика через оверлейные сети конфигурируются в рамках последовательной стратегии «итерация исследования – ожидание ответа – смена личности». Это может быть связано как с техническими ограничениями сети, так и со сложностью и ресурсоемкостью организации параллельного сканирования. Для такого сканирования используются другие признаки вектора атаки, при этом вероятность идентификации хакера снижается. В случае невозможности идентификации система может просто фальсифицировать определенный снимок программного обеспечения при сканировании из одной сети в определенный кратко- и среднесрочный интервал времени.

При комплексном примитивном сканировании с одного IP-адреса система фиксирует низкий уровень опасности и предоставляет идентичный слепок ПО для всех типов сканирования/зондирования.

В функционал системы была также заложена функция блокировки доступа к различным пулам

адресных пространств. На стадии проектирования системы была внедрена нулевая маршрутизация. Blackhole – в UNIX-системах маршрутизация «в никуда». Необходимые информационные потоки отбрасываются в силу отсутствия маршрута до хоста. Данным подходом был нейтрализован существенный недостаток существующих решений защиты: критичное замедление работы при большом объеме правил и адресов в пакетном фильтре с общим ограничением на их количество.

Обсуждение результатов и заключение

В данной работе были проанализированы современные подходы хакеров к проведению кибератак, описана одна из стратегий с использованием комбинирования виртуальных защищенных каналов связи, средств анонимизации, оверлейных технологий и сетей. Предложен оригинальный подход к противодействию подобным несанкционированным воздействиям.

Научная новизна заключается в идентификации злоумышленников (осуществляющих активный сбор данных с применением технологий анонимизации) посредством составления векторов атаки на основе ряда признаков: принадлежность адресного пространства к сети анонимизации, исчерпание пула адресного пространства (личностей) сети анонимизации, тип активного / пассивного исследования, ход выполнения типа исследования, корреляция с искусственными задержками и др.

Программная реализация данного проекта была успешно протестирована в ручном и автоматизированном режимах. Данный метод используется в авторском модуле фальсификации функционирующего программного обеспечения на объекте исследования для различных хакеров. Для проведения экспериментальной проверки метода 50 специалистов в сфере информационной безопасности анонимно исследовали модельный объект в течение недели и представили список идентифицированных ОС, сервисов и служб. Сводный протокол результатов продемонстрировал успешность метода в 96% случаев. 4% неудачной защиты относятся к 8 участникам эксперимента, которые применяли параллельное сканирование в единый момент времени из пула одной сети анонимизации. При этом система не выдала себя несопоставимыми ответами, действия в состоянии неопределенности сводились к имитации закрытого порта либо выдачи идентичной информации нескольким источникам с тождественным «слепком» объекта. Важно понимать, что принципиально невозможно обеспечить гарантированный уровень безопасности информационных ресурсов.

Достиженные результаты в полном объеме удовлетворяют требованиям поставленной задачи. С практической точки зрения данные решения могут быть использованы в межсетевых экранах и шлюзах вычислительных сетей.

Литература

1. За год на Россию было совершено более четырех миллиардов кибератак [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rg.ru/2018/12/12/za-god-na-rossiiu-bylo->

soversheno-bolee-chetyreh-milliardov-kiberatak.html, свободный (дата обращения: 2019.03.22)

2. Отчет по информационной безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://trc.ru/upload/checkpoint/analytic_reports/check%20point_25052018_Screen_Letter_RUSv3bis.pdf, свободный (дата обращения: 2019.03.22).

3. Способы противодействия сетевому сканированию / А.В. Болдырев, Д.Ю. Верещагин, А.Г. Жулькин, А.Б. Ягудеев // Информационная безопасность. – 2016. – № 3, т. 1. – С. 401–404.

4. Implementation and vulnerability test of stealth port scanning attacks using ZMap of censys engine. / S. Lee, S. Im, S. Shin, B. Roh, C. Lee // International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). – Jeju. – 2016. – P. 681–683.

5. Ananin E.V. Port scanning detection based on anomalies / E.V. Ananin, A.V. Nikishova, I.S. Kozhevnikova // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, 2017. – P. 1–5.

6. Французова Г.А. Самоорганизующаяся система управления трафиком вычислительной сети: метод противодействия сетевым угрозам / Г.А. Французова, А.В. Гунько, Е.А. Басыня // Программная инженерия. – 2014. – № 3. – С. 16–20.

7. Басыня Е.А. Самоорганизующаяся система управления трафиком вычислительной сети / Е.А. Басыня, Г.А. Французова, А.В. Гунько // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1 (31). – С. 179–184.

8. Open-source intelligence [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source_intelligence, свободный (дата обращения: 2019.03.24).

9. Кожевникова И.С. Исследование методов обнаружения сканирования портов / И.С. Кожевникова, А.О. Пасюк // Вестник ВолГУ. Сер. 9: Исследования молодых ученых. – 2016. – № 14. – С. 30–31.

10. Анализ атак с использованием сканирования портов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.anti-malware.ru/analytics/Threats_Analysis/Examining-Port-Scan-Attacks, свободный (дата обращения: 2019.03.24).

11. Листеренко Р.Р. Продвинутое атаки требуют новых видов защиты информации / Р.Р. Листеренко, В.Г. Карабатырова // Вопросы кибербезопасности. – 2013. – № 2. – С. 34–39.

12. Лазаренко А.В. Технологии деанонимизации пользователей Тог // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2016. – №19. – С. 257–262.

13. Бойченко О.В. Модель OSI в защите данных корпоративной сети / О.В. Бойченко, А.С. Ивченко // Инновационная наука. – 2016. – № 3-1 (15). – С. 114–116.

14. Чемодуров А.С. Защита интернет-шлюза и фильтрация сетевого трафика корпоративной сети / А.С. Чемодуров, А.Ю. Карпутина // Концепт. – 2015. – № 1. – С. 1–6.

15. Абдуллаев В.Г. Защита от спама в интернет-пространстве // Радиоэлектроника и информатика. – 2014. – № 2. – С. 35–38.

Басыня Евгений Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. автоматизации Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), директор Научно-исследовательского института информационно-коммуникационных технологий Карла Маркса пр-т, д. 20, г. Новосибирск, Россия, 630073 ORCID 0000-0003-3916-7783 Тел: 8 (383-3) 46-11-19 Эл. почта: basinya@corp.nstu.ru

Хиценко Владимир Евгеньевич

Кандидат техн. наук, доцент каф. защиты информации (ЗИ) НГТУ Карла Маркса пр-т, д. 20, г. Новосибирск, Россия, 630073 Тел: +7 (383-3) 46-08-53 Эл. почта: xicenko@corp.nstu.ru

Рудковский Александр Александрович

Студент, каф. ЗИ НГТУ Карла Маркса пр-т, д. 20, г. Новосибирск, Россия, 630073 ORCID 0000-0001-6856-3908 Тел: +7 (383-3) 46-08-53 Эл. почта: rudkovskiyalex@gmail.com

Basinya E.A., Khitsenko V.E., Rudkovskiy A.A.

Method to identify cybercriminals using network analysis of information systems with anonymization

In this paper, modern tactics of the hackers to conduct cyber-attacks were analyzed, a strategy to investigate an object of attack using the combined virtual secure communication channel, anonymization tools are described, including overlay technologies and networks. An original method of counteraction of such unauthorized activities is provided. The scientific novelty of the work consist in the identification of intruders (performing active harvest of the data using technology of anonymization) by making assault vectors based on a number of parameters. For example, address space belonging to anonymization network, pool exhaustion for anonymization network address space (identity), type of active/passive scan, progress of the scan type, correlation of the parameters due to artificial delays and etc. The method to identify the attackers who are using tools of the automated active and passive analysis of traffic and information systems by applying technologies of anonymization, described in the article, is used together with the author's module of falsification of operating systems and the services functioning on them in a wide range of variations for various hackers. This allows misinforming successfully hacker on first step of the cyber-attacks. The software implementation of the author's method was successfully tested, experimentally investigated. The target area of application are server solutions that operate based on the TCP/IP Protocol stack

Keywords: anonymization overlay networks, scanning, probing, misinformation.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-45-51

References

1. Over a year, Russia has been committed more than four billion cyberattacks. Available at: <https://rg.ru/2018/12/12/za-god-na-rossiiu-bylo-soversheno-bolee-chetyreh-milliardov-kiberatak.html> (Accessed: March 22, 2019).
2. Information security report. Available at: http://trc.ru/upload/checkpoint/analytic_reports/check%20point_25052018_Screen_Letter_RUSv3bis.pdf (Accessed: March 22, 2019)
3. Boldyrev A.V., Vereshchagin V., Zhulkin A.G., Yagudaev A.B. Sposoby protivodejstviya setevomu skanirovaniyu [Ways to counter network scanning]. *Information security*, 2016, no. 3, vol. 1, pp. 401–404.
4. Lee S., Im S., Shin S., Roh B., Lee C. Implementation and vulnerability test of stealth port scanning attacks using ZMap of censys engine. *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, 2016, pp. 681–683.

5. Ananin E.V., Nikishova A.V., Kozhevnikova I.S. Port scanning detection based on anomalies. *Dynamics of Systems, mechanics and Machines (Dynamics)*, Omsk, 2017, pp. 1–5.
6. Frantsuzova G.A., Gunko A.V., Basiya E.A. Samoorganizuyushchayasya sistema upravleniya trafikom vychislitel'noj seti: metod protivodejstviya setevym ugrozam [Self-organizing control system of computer network traffic: method to counter network threats]. *Software engineering*, 2014, no. 3, pp. 16–20.
7. Basiya E.A., Frantsuzova G.A., Gunko A.V. Samoorganizuyushchayasya sistema upravleniya trafikom vychislitel'noj seti [Self-organizing control system of computer network traffic]. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 1 (31), pp. 179–184.
8. Open-source intelligence. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source_intelligence (Accessed: March 24, 2019).
9. Kozhevnikova I.S., Pasyuk O.A. Issledovanie metodov obnaruzheniya skanirovaniya portov [The Study of methods of detecting port scanning]. *Bulletin of the Volga. Series 9: Research of young scientists*, 2016, no. 14, pp. 30–31.
10. Analysis of attacks using port scanning. Available at: https://www.anti-malware.ru/analytics/Threats_Analysis/Examining-Port-Scan-Attacks (Accessed: March 24, 2019).
11. Nesterenko R.R., Karabutov V.G. Prodvinutye ataki trebuyut novyh vidov zashchity informacii [Advanced attacks call for new kinds of information security]. *Cyber security issues*, 2013, no. 2, pp. 34–39.
12. Lazarenko V.A., Tekhnologii deanonimizacii pol'zovatelej Tor [Technology deanonymization Tor users]. *New information technologies in automated systems*, 2016, no. 19, pp. 257–262.
13. Boychenko O.V., Ivchenko A.S. Model' osi v zashchite dannyh korporativnoj seti [OSI Model in corporate network data protection]. *Innovative science*, 2016, no. 3-1 (15), pp. 114–116.
14. Chemodurov A.S., Carpatina A.Y. Zashchita internet-shlyuza i fil'traciya setevogo trafika korporativnoj seti [Protection of the Internet gateway and filtering network traffic corporate network]. *Considered*, 2015, no. 1, pp. 1–6.
15. Abdullayev V.G. Zashchita ot spama v Internet prostranstve [Protection against spam in the Internet space]. *Radioelectronics and Informatics*, 2014, no. 2, pp. 35–38.

Evgeny A. Basiya

Candidate of Engineering,
Assistant Professor, Automation Department
Novosibirsk State Technical University (NSTU)
20, Karl-Marks st., Novosibirsk, Russia, 630073
ORCHID 0000-0003-3916-7783
Phone: + 7 (383-3) 46-11-19
Email: basinya@corp.nstu.ru

Vladimir E. Khitsenko

Candidate of Engineering, Assistant Professor,
Protection of Information Department NSTU
20, Karl-Marks st., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7 (383-3) 46-08-53
Email: xicenko@corp.nstu.ru

Alexander A. Rudkovsky

Student, Protection of Information Department NSTU
20, Karl-Marks st., Novosibirsk, Russia, 630073
ORCHID 0000-0001-6856-3908
Phone: +7 (383-3) 46-08-53
Email: rudkovskiyalex@gmail.com

УДК 004.912+004.932.2

А.В. Козачок, С.А. Копылов

Подход к маркированию текстовых электронных документов и его сравнение с существующими аналогами

Обеспечение безопасности текстовых данных, представленных как в электронном, так и в напечатанном виде, является одним из актуальных направлений исследований. В данной работе представлены результаты экспериментальной оценки разработанного подхода к маркированию текстовых документов, рассмотрены особенности формируемого водяного. Проведен обзор существующих исследований в области маркирования текстовых данных, определены их основные достоинства и недостатки. Представлены результаты сравнительного анализа параметров встраивания и извлечения разработанного подхода с рассмотренными аналогами. Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: защита информации, маркирование текстовых данных, текстовая стеганография.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-52-60

В последние десятилетия резко возросло количество инцидентов нарушения информационной безопасности в области защиты интеллектуальной собственности и защиты авторских прав. Основным объектом защиты современных средств обеспечения безопасности данных являются изображения и данные мультимедиа. В то же время проблеме защиты авторских прав владельцев текстовой информации и защиты текстовой информации от утечки не уделяется должного внимания [1].

Современные средства защиты текстовых данных от утечки и защиты авторских прав в должной мере не позволяют обеспечить надежную защиту [2–6]. Указанный факт обусловлен возможностью преобразования формата исходного текстового документа в изображение, содержащее текст. При этом обнаружение исходных данных в существующих системах защиты основано на средствах оптического распознавания символов, характеризующихся наличием ошибок в процессе распознавания. Для устранения указанного недостатка необходимо разрабатывать новые методы защиты текстовой информации от утечки. В качестве такого метода может выступать подход к маркированию текстовых данных, основанный на стеганографическом внедрении робастного водяного знака.

Подход к маркированию электронных текстовых документов

В качестве подхода к маркированию текстовых данных выступает подход, разработанный авторами, описанный в [7–10]. Маркирование осуществляется посредством изменения величины межстрочного интервала на величину перцептивно невидимую для человеческого глаза (рис. 1). В качестве маркера может выступать идентификационная информация, характеризующая владельца данных, сами данные, либо другая метаинформация. Встраивание маркера, представленного робастным водяным знаком (РВЗ), реализовано следующим образом:

– увеличение величины межстрочного интервала на установленное значение Δ между соседними строками текста интерпретируется как встраиваемая «1»;

– отсутствие изменений в величине межстрочного интервала между соседними строками текста интерпретируется как встраиваемый «0».

1	Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi.
2	Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobor.
3	vitae, ultricies et, tellus. Donec, aliquet, tortor sed accumsan biben.
4	erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. $h + \Delta_i$
5	tesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturi
6	montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. $h - \Delta_i$
7	per vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Рис. 1. Вариант встраивания информации на основе изменения межстрочного интервала

В ходе экспериментальной оценки предложенного подхода установлены следующие параметры:

1. Емкость встраивания зависит от кегля шрифта и величины межстрочного интервала исходного текста и не зависит от гарнитуры и параметров используемого шрифта.

Значения предельно достижимой емкости встраивания представлены в табл. 1.

Таблица 1

Предельно достижимая емкость встраивания

Кегль шрифта (пт)	Межстрочный интервал (множитель)	Предельно достижимая емкость встраивания (бит)
10	1	60
10	1,25	48
10	1,5	40
12	1	49
12	1,25	39
12	1,5	33
14	1	42
14	1,25	33
14	1,5	28

2. Граница перцептивной невидимости встроенных данных находится в пределах изменения величины межстрочного интервала на $\pm 0,15$ от исходного.

3. Точность извлечения встроенных данных из изображений, содержащих текст, составляет не ме-

нее 95% при использовании параметра встраивания, характеризующимся увеличением величины множителя межстрочного интервала на 0,04 и более с шагом 0,01. Указанные значения точности извлечения соответствуют изображениям с показателем разрешения не менее 150 точек на дюйм. Результат извлечения встроенной информации из изображения, содержащего текст с размером шрифта 14 пт, величиной межстрочного интервала 1 и величиной изменения межстрочного интервала 0,10 интервала (0,49 мм), представлен в табл. 2.

В процессе экспериментальной оценки точности извлечения данных было извлечено более 10 000 бит (более 250 страниц текстовой информации), что позволяет утверждать о том, что доверительный интервал равен 0,95 при точности 0,01. Результаты оценки зависимости точности извлечения данных,

ошибок первого и второго рода от величины изменения межстрочного интервала из изображений, содержащих РВЗ, представлены на рис. 2.

Разработанный подход обеспечивает инвариантность встроенных данных к следующим преобразованиям:

- преобразование формата электронного текстового документа в текстовое изображение, в том числе посредством операции «печать–сканирование»;
- поворот текстового изображения на любой угол;
- масштабирование текстового изображения со значением множителя масштабирования, не превышающим $\pm 1,5$;
- фильтрация текстового изображения (медианная, гауссовская, модовая);
- сжатие с потерями при использовании показателя качества, не превышающего 50%.

Таблица 2

Результат извлечения информации из изображения, содержащего текст

Разрешение изображения (DPI)	Время обработки, с	Число строк в исходном документе	Извлеченное число строк	Точность	Вероятность ложных срабатываний	Вероятность пропуска цели
25	0,9	41	40	0,667	0,033	0,30
50	4	41	41	0,886	0,033	0,081
100	15	41	41	0,984	0,016	0
150	34	41	41	0,992	0,008	0
200	62	41	41	0,992	0,008	0
250	105	41	41	0,992	0,008	0
300	166	41	41	0,992	0,008	0

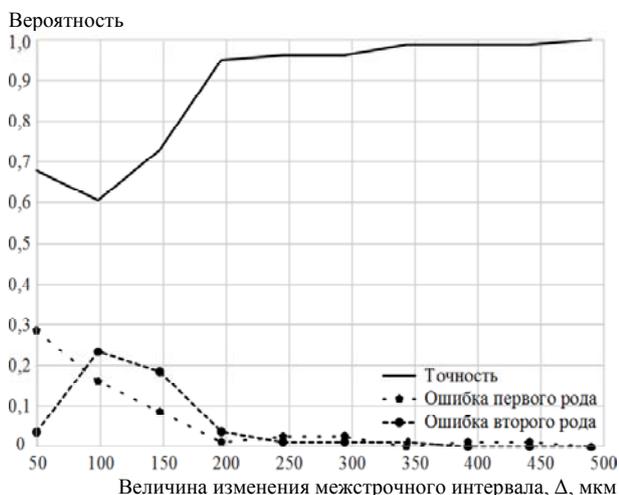


Рис. 2. Оценка зависимости точности извлечения информации, ошибок первого и второго рода от величины изменения межстрочного интервала

Полученные результаты экспериментальной оценки разработанного подхода к маркированию текстовых данных позволяют сделать вывод о возможности применения указанного подхода для идентификации текстовых данных, защиты от утечки и защиты авторского права. В то же время необходимо провести сравнительную оценку разработанного подхода с существующими аналогами в области маркирования текстовых данных.

Обзор текущих исследований в области маркирования текстовых данных

В ходе проведения сравнительного анализа исследований в области маркирования текстовых данных рассмотрены следующие подходы предложенные: Брассилом [11–13], Коксом [14], Лиу [15], Хуангом [16] и Алаттаром [17]. В качестве базового аналога выступает подход, описанный Брассилом.

В работах Брассила [11–13] представлен подход к маркированию текстовых документов, основанный на внедрении кодовой последовательности посредством смещения линии текста. Кодирование информации осуществляется следующим образом:

- линия текста нечетной строки абзаца не изменяется, что соответствует встраиваемому «0»;
- линия текста четной строки абзаца может быть смещена вверх, что соответствует встраиваемой «-1» и вниз, что соответствует встраиваемой «+1»;
- величина абзацного отступа не изменяется.

Емкость встраивания рассматриваемого подхода зависит от размера кегля гарнитуры шрифта и ограничена величиной 19 бит (при использовании кегля размером 12 пт). Указанные значения емкости встраивания обусловлены требованиями, предъявляемыми к решающему правилу детектора в процессе извлечения встроенной информации.

Извлечение встроенной информации из изображений, содержащих исходный текст, состоит из следующих этапов:

- предварительная обработка изображения;
- выравнивание изображения по направлению текста;
- построение горизонтального профиля проекции изображения;
- определение направления смещения строки:
 - 1) измерение расстояния между базовыми линиями профиля проекции;
 - 2) измерение расстояния между центроидами профиля проекции.

В ходе предварительной обработки из изображения удаляется шум, вносимый принтером в процессе печати документа. Полученное изображение выравнивается по направлению текста, после чего осуществляется построение горизонтального профиля проекции обработанного изображения. Профиль проекции представляет собой график суммирования интенсивностей пикселей каждой строки изображения. Для определения положения смещения линии текста используются два подхода. Первый подход основан на измерении расстояния между базовыми линиями профиля проекции. В качестве базовой линии выступает пик профиля проекции линии текста, наиболее близко расположенный относительно дна. В отличие от базовой линии центроид представляет собой центр масс пика профиля проекции линии текста. В случае использования подхода к извлечению линии текста, основанного на измерении расстояния между базовыми линиями, решающее правило детектора имеет следующий вид:

- если $s_{i-1} > s_i$: базовая линия смещена вниз,
- если $s_{i-1} < s_i$: базовая линия смещена вверх,
- иначе: смещение не определено,

где s_{i-1} – расстояние между линиями $i-1$ и i ; s_i – расстояние между линиями i и $i+1$ (при этом $i-1$ и $i+1$ – линии, положение которых не изменялось в процессе встраивания).

Решающее правило детектора, используемого в подходе к извлечению линии текста, основанного на расстоянии между центроидами, описывается следующим образом:

- если $s_{i-1} - t_{i-1} > s_i - t_i$: базовая линия смещена вниз,
 - иначе: базовая линия смещена вверх,
- где s_{i-1} и s_i – расстояние между центроидами линий $i-1$ и i и линий i и $i+1$, соответственно, текста, содержащего встроенные данные; t_{i-1} и t_i – расстояние между центроидами линий $i-1$ и i и линий i и $i+1$ соответственно исходного текста.

Предложенные подходы к определению смещения строки позволяют повысить точность извлечения встроенной информации. Однако, использование в процессе анализа двух строк для извлечения одного бита встроенной информации снижает предельно достижимую емкость встраивания в два раза. Кроме того, для правильного детектирования и извлечения встроенной информации необходимо наличие как исходного изображения, так и опорного базиса (эталонного образца), позволяющих определить направление смещения линии текста.

В ходе экспериментальной оценки установлено, что минимальная величина сдвига линии текста ограничена величиной в 1 пиксель текста, выводимого на печать с разрешением 300 точек на дюйм (примерно 0,085 мм). Данное ограничение обусловлено разрешающей способностью принтера, на котором осуществляется печать документа. При этом данный подход характеризуется следующими значениями предельно достижимой емкости встраивания: кегль размером 8 пт – 23 бита; 10 пт – 21 бит и 12 пт – 19 бит.

Внедрение кодовой последовательности осуществлялось в страницу текста, набранного гарнитурой Times New Roman с размером кегля 8, 10 и 12 пт посредством смещения линии текста вверх и вниз на величину 1, 2 и 3 пикселя.

В ходе извлечения встроенной информации подход, основанный на измерении расстояния между центроидами, позволил безошибочно установить смещение линии текста для каждой комбинации встраивания. При этом подход, основанный на измерении расстояния между базовыми линиями профиля проекции, характеризуется наличием ошибок. Так, точность извлечения данных для кегля размером 8 пт и величиной встраивания 1 пиксель составляет 78% (5 строк не извлечены), а для 12 пт и 1 пиксель – 94%.

Подход, основанный на измерении расстояния между центроидами, позволил безошибочно определить смещение линии текста кеглем 10 пт. В то же время точность извлечения подхода, основанного на измерении расстояния между базовыми линиями, составила не более 76%.

Представленный подход к маркированию текстовых документов характеризуется следующими параметрами робастности встроенных данных:

- преобразование формата электронного текстового документа в изображение, содержащее текст, посредством применения операции «печать–сканирование»;
- перекопирование (до 10 раз) напечатанного текстового документа;
- поворот изображения на угол $\pm 3^\circ$;
- размытие изображения (гауссовская фильтрация);
- масштабирование изображения, содержащего встроенные данные с коэффициентом масштабирования $\pm 4\%$.

Маркирование текстовых документов, предложенное в работе [14], основано на технологии преобразования доменов. Цифровой водяной знак (ЦВЗ) представляет собой информацию в виде последовательности действительных чисел $X = x_1, x_2, \dots, x_N$ длиной N . ЦВЗ встраивается в частотные компоненты изображения, содержащего текстовые данные, следующим образом:

- вычисление частотных коэффициентов АС изображения $D(x, y)$, содержащего текст, $C_D(k_x, k_y)$, посредством двумерного дискретного косинусного преобразования;

– извлечение последовательности $V = v_1, v_2, \dots, v_N$, состоящей из полученных коэффициентов $C_D(k_x, k_y)$, значение которых превышает N ;

– сложение элементов последовательности V с ЦВЗ X по следующему правилу: $v'_i = v(i + \alpha \cdot x_i)$, где α – параметр масштабирования, определяющий степень искажения изображения;

– встраивание последовательности V' в $C_D(k_x, k_y)$ вместо V посредством обратного дискретного косинусного преобразования.

В результате встраивания формируется подписанное текстовое изображение D' . К сформированному изображению D' могут быть применены различные операции обработки, в том числе передача по каналу связи, в ходе которых в текстовое изображение могут быть внесены искажения и шум. В результате таких преобразований на анализатор ЦВЗ поступает преобразованное изображение D^* , содержащее встроенные данные. Для правильного извлечения встроенных данных на стороне приема необходимо наличие исходного изображения и соответствующего ему ЦВЗ. Процесс извлечения встроенных данных состоит из следующих этапов:

– извлечение последовательностей $V^* = v_1^*, v_2^*, \dots, v_N^*$ и $V = v_1, v_2, \dots, v_N$ из частотных коэффициентов изображений D^* и D соответственно посредством дискретного косинусного преобразования;

– вычисление искаженного ЦВЗ $X^* = V^* - V$;

– сравнение исходного X и искаженного X^* ЦВЗ согласно указанному правилу:

$$\text{sim}(X, X^*) = \frac{X^* \cdot X}{\sqrt{X^* \cdot X^*}}$$

– вывод об аутентичности встроенных данных.

В ходе экспериментальной оценки емкости встраивания разработанного подхода было установлено, что длина водяного знака может быть произвольной и зависит от количества используемых частотных компонент, в которые осуществляется встраивание. Так, в случае четырехкратного увеличения числа используемых частотных компонент вдвое увеличивается предельно достижимая емкость встраивания. Однако такое увеличение в значительной степени искажает качество исходного изображения, что приводит к отсутствию перцептивной невидимости встроенных данных. Кроме того, в процессе встраивания информации в частотные компоненты изображения осуществляется изменение фона изображения. Указанные особенности не позволяют отнести рассмотренный подход к перцептивно невидимым подходам встраивания при использовании ЦВЗ, характеризующихся большой длиной.

В рассматриваемом подходе предложено использовать ЦВЗ длиной, не превышающей 1000 символов, что соответствует наличию незначительных изменений в фоне подписанного изображения, не влияющих на невидимость встроенных данных к визуальному анализу.

Оценка извлекаемости и робастности разработанного подхода производилась посредством извлечения встроенной информации как после применения различных преобразований и внесения искажений, так и без таковых. Извлекаемость ЦВЗ основана на способности детектора обнаружить встроенный ЦВЗ среди случайно сгенерированных. Практические результаты показали, что среди 1000 случайно сгенерированных ЦВЗ только в 1 случае детектор обнаружил встроенные данные. При этом количественная оценка точности извлечения встроенных данных из изображений не представлена.

В ходе оценки робастности подхода к маркированию текстовых данных [13] учтены результаты экспериментов, проведенных в [14]. Разработанный ЦВЗ устойчив к следующим преобразованиям:

– внесение в изображение гауссовского шума;

– масштабирование изображения с множителем 0,5;

– обрезка не более 75% изображения;

– сжатие изображения по алгоритму JPEG с показателем качества не более 10%.

Представленный подход характеризуется следующими ограничениями:

– низкая перцептивная невидимость при большой длине ЦВЗ;

– низкая робастность к преобразованию формата документа, обусловленная операцией «печать–сканирование» и фотокопированием;

– отсутствие устойчивости к вращению, сдвигу и повороту изображения;

– отсутствие устойчивости к фильтрации (медианной, усредненной);

– вычислительная сложность извлечения встроенных данных.

В работе [15] предложена гибридная схема маркирования текстовых документов. В качестве алгоритма встраивания ЦВЗ выступает один из подходов, описанных в [11–13]. Помимо подхода к встраиванию, основанного на смещении положения линии текста, авторами [11–13] предложено использовать смещение слова внутри строки текста, а также кодирование символов.

Для извлечения встроенных данных использован подход, предложенный в [14]. Отличительной особенностью разработанного подхода от [14] является процедура очистки фона подписанного изображения. Применение данной технологии позволяет увеличить емкость встраивания в 10 раз по сравнению с [14], при этом встроенные данные находятся в границах перцептивной невидимости.

В то же время использование алгоритма встраивания, основанного на сдвиге линии или на смещении слова, характеризуется наличием ошибок в процессе извлечения данных. Кроме того, для корректного извлечения данных детектору необходимо наличие исходного изображения.

В качестве подхода к маркированию текстовых данных может быть рассмотрен подход к внедрению ЦВЗ в текстовые изображения, описанный в [16]. Для маркирования текстового документа предложено

но использовать свободное пространство (пространство пробелов) между словами. Кодирование информации реализуется посредством преобразования пустого текстового пространства, характеризующегося средним расстоянием между словами в строке, в вид синусоидальной формы. Встраивание информации в изображение, содержащее текст, реализовано следующим образом:

- определение ключевой строки текста (строка текста с заданным количеством слов);

- формирование массива строк S_w посредством выбора равных или превышающих ключевую строку по количеству слов;

- вычисление среднего значения пустого пространства строки S_a и текста a для сформированного массива строк:

$$a = \frac{\sum_{m=u}^v S_{am}}{v-u+1}, \quad 0 \leq u < v < N, \quad (1)$$

где u, v – первая и последняя линия (строка) сформированного массива; m – индекс строк текста сформированного массива; S_{am} – среднее значение пустого пространства строки;

- формирование ЦВЗ для каждой строки массива согласно выражению

$$W_m = C \cdot a \cdot \sin(\omega(m-u) + \phi),$$

где ω – частота; ϕ – начальная фаза; C – константа, определяющая амплитуду синусоидальной волны (диапазон значений 0,2–0,3);

- в каждой линии массива строк S_a заменяется на S_{am} следующим образом:

$$S'_{am} = a + W_m, \quad \text{если } m \in S_w;$$

- корректировка величины интервала между словами посредством расширения (сжатия) пустого пространства после каждого слова из массива строк S_w в синусоидальный вид.

Извлечение встроенной информации реализуется следующим образом:

- восстановление массива строк S_w посредством ключевой строки текста;

- вычисление среднего значения пустого пространства текста посредством (1);

- извлечение ЦВЗ W_m из подписанного изображения посредством вычитания a ;

- определение начальной фазы за счет вычисления взаимной корреляции полученного сигнала синусоидальной формы.

В ходе экспериментальной оценки разработанного алгоритма были протестированы 6 изображений, содержащих текст, со следующими параметрами:

- разрешение изображения 300 точек на дюйм;
- кегль шрифта 11 пт;
- выравнивание по ширине текста.

В ходе оценки извлекаемости разработанного подхода к маркированию текстовых данных произведена оценка емкости встраивания и точности из-

влечения встроенных данных из изображений, содержащих текст. Емкость встраивания характеризуется произвольной длиной ЦВЗ и зависит от формы синусоидальной волны, параметров, которыми она описывается, а также от параметров ключевой строки. Так, на примере тестового изображения, содержащего 52 строки, емкость встраивания варьируется в пределах от 15 до 23 бит. При этом предельно достижимая емкость встраивания для текста в 52 строки, набранного кеглем размером 11 пт, составляет 42 бита.

Проведение 4 экспериментов по извлечению встроенных данных не позволяет произвести количественную оценку в пределах доверительного интервала 0,01. Однако результат извлечения характеризуется одиночными ошибками извлечения. Так, из встроенных в текстовые данные 68 бит информации правильно извлечены 64 бита. Указанная особенность обусловлена алгоритмом встраивания, а именно процессом расширения (сжатия) строк. Расширение (сжатие) строк приводит к уменьшению расстояния между словами, вплоть до наложения слов друг на друга, что в процессе извлечения не позволяет правильно обнаружить и извлечь встроенную информацию.

Перцептивная невидимость встроенных данных достигается за счет выбора ключевой строки с количеством строк, близким к максимальному значению, а также небольших значений константы C , определяющей амплитуду синусоидальной волны.

Разработанный подход обеспечивает робастность к следующим преобразованиям:

- наклон (поворот) текстового изображения на угол не более 5°;

- передискретизация текстового изображения с параметрами качества не ниже 50% от исходного изображения при применении фильтра низких частот;

- преобразование формата текстового изображения посредством применения операции «печать–сканирование»;

- перекопирование напечатанного текстового изображения (до 10 раз).

Для правильного извлечения встроенной информации из изображений, содержащих ЦВЗ, полученных посредством применения операции «печать–сканирование», необходимо провести двухэтапную обработку отсканированного изображения. На первом этапе осуществляется горизонтальное сканирование, определение положения границ линий текста и вертикальное расширение символов внутри отдельных строк. На втором этапе определяются границы слов и осуществляется удаление всех изолированных символов, ширина которых меньше установленного значения.

В отличие от предыдущих методов маркирования текстовых данных указанный метод не требует наличия исходного изображения в процессе извлечения данных. При этом вносятся ограничения на внедрение ЦВЗ только в тексты, выровненные по ширине, а также по наличию дополнительных этапов, направленных на коррекцию расширения (сжа-

тия) интервалов между словами с целью недопущения перекрытия слов и определение положения строк, слов, а также их границ после сканирования изображения.

В работе [17] предложен подход к маркированию текстовых документов, основанный на изменении величины интервала между словами. Встраивание информации в текстовые данные реализовано следующим образом:

- исходная информация подвергается помехоустойчивому кодированию (в качестве помехоустойчивого кода могут выступать код Хэмминга (7,4) или БЧХ (15,7));

- преобразование полученной кодовой последовательности в 16-битную периодическую m -последовательность посредством регистра сдвига;

- формирование 16-битового кода расширенного спектра вида $\{-1,1\}$;

- сканирование текстового документа с целью обнаружения интервалов между словами;

- определение величины пустого пространства между словами каждой строки текста;

- изменение интервала между словами за счет расширения (сжатия) пустого пространства после каждого слова в строке на величину Δ (в зависимости от символа кодовой последовательности: «-1» соответствует уменьшению интервала, «1» – увеличению).

Извлечение встроенной информации может быть реализовано как из электронного текстового документа, так и из соответствующей печатной копии. Алгоритм извлечения встроенных данных из электронного документа состоит из следующих этапов:

- обнаружение и измерение пустого пространства между двумя последовательно идущими словами внутри каждой строки текста;

- вычисление среднеарифметического значения пустого пространства между словами относительно предшествующего и последующего интервала между словами;

- определение положения смещения слова посредством сравнения среднеарифметического значения пустого пространства с измеренным;

- декодирование полученной последовательности.

Извлечение встроенной информации из напечатанных на бумаге текстовых документов требует наличия дополнительных этапов:

- сканирование напечатанного текстового документа с разрешением не менее 300 точек на дюйм;

- преобразование отсканированного текстового изображения в бинарное;

- выравнивание ориентации изображения по линии текста;

- извлечение строк текста из бинарного изображения посредством построения горизонтального профиля проекции;

- определение расстояния между словами текста из горизонтального профиля проекции;

- корректировка полученных значений величин интервалов между словами;

- объединение полученных значений в массив данных;

- выполнение алгоритма извлечения встроенных данных из электронного документа.

В ходе экспериментальной оценки разработанного подхода к маркированию текстовых данных были проведены эксперименты, направленные на определение извлекаемости и точности извлечения встроенных данных.

В разработанном подходе к маркированию емкость встраивания зависит от количества текстовой информации, а также от параметров помехоустойчивого кода и кода расширенного спектра. Предельно достижимая емкость встраивания для текста, набранного гарнитурой Times New Roman с кеглем 11 пт, двойным межстрочным интервалом на листе формата Letter, составляет 300 бит. В ходе экспериментальной оценки предложенного алгоритма используемая длина внедряемой последовательности составляет 32 бита, при этом длина ЦВЗ составляет 8 бит.

В ходе оценки извлекаемости встроенных данных произведено извлечение встроенной информации из неподписанного текстового документа. Точность извлечения составляет 98,8%, что свидетельствует о наличии одиночных ошибок в процессе извлечения. Количественная оценка точности извлечения из подписанных электронных и напечатанных на бумаге текстовых документов не представлена. Однако авторами приведена информация о наличии как одинарных, так и двойных ошибок после декодирования полученных значений. Данный факт свидетельствует о высоком проценте ошибок в процессе извлечения данных и требует использования помехоустойчивых кодов с большей исправляющей способностью, что в свою очередь приводит к снижению предельно достижимой емкости встраивания.

Перцептивная невидимость встроенных данных основана на оценках, приведенных в работах [11–15]. Полученные ранее результаты позволяют отнести разработанный алгоритм к маркированию текстовых данных к перцептивно невидимым. Оценка робастности разработанного подхода к внесению искажений и осуществлению преобразований не проводилась.

Обсуждение результатов

Результаты анализа исследований в области маркирования текстовых данных позволяют перейти к сравнительной оценке разработанного подхода к рассмотренными аналогами. Сравнительная оценка проводилась по двум направлениям: по параметрам встраивания и извлечения информации, представленной водяным знаком, и по робастности встроенных данных к осуществлению преобразований и внесению искажений.

В ходе первого направления оценки разработанного подхода с рассмотренными аналогами получены результаты емкости встраивания, перцептивной невидимости, извлекаемости, точности извлечения и вычислительной сложности, представленные в табл. 3.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что разработанный подход к мар-

кированию текстовых данных превосходит рассмотренные аналоги по точности извлечения встроенных данных, не накладывая требований по наличию исходного изображения в процессе извлечения данных. Кроме того, предложенный подход характеризуется низкой вычислительной сложностью. При этом предельно достижимая емкость встраивания превышает базовый аналог и [15], однако уступает

[13, 14, 16]. Данная особенность обусловлена тем, что встраивание водяного знака производится в текстовые данные, а не в изображения, содержащие текст, как в [13, 14, 16].

В ходе оценки робастности встроенных данных рассмотренных подходов с разработанным подходом к осуществлению преобразований и внесению искажений получены результаты, представленные в табл. 4.

Таблица 3

Встраивание и извлечение информации в текстовые данные

Параметр	Исследование					
	Разработанный подход	[11–13]	[14]	[15]	[16]	[17]
Границы перцептивной невидимости	$\pm 0,15$ от исходного межстрочного интервала	Аналогично [7–10]	–	+	$0,1 \leq C \leq 0,2$	На основе оценок [11–17]
Емкость встраивания (бит)	60	23	1000	10000	42	300
Точность извлечения (%)	≥ 95	≤ 78	Данные отсутствуют	Данные отсутствуют	*	*
Наличие исходного документа	–	+	+	+	–	–
Вычислительная сложность	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая

* Недостаточно данных для оценки параметра.

Таблица 4

Робастность встроенных данных к внесению искажений и осуществлению преобразований

Параметр	Исследование					
	Разработанный подход	[11–13]	[14]	[15]	[16]	[17]
Преобразование формата текстового документа в изображение	+	+	–	–	+	Данные отсутствуют
Перекопирование	До 5 раз	До 10 раз	–	–	До 10 раз	Данные отсутствуют
Поворот изображения (градусы)	На любой угол	$\leq \pm 3$	–	–	$\leq \pm 5$	Данные отсутствуют
Масштабирование (множитель)	$\pm 1,5$	$\pm 0,04$	0,5	0,5	–	Данные отсутствуют
Внесение шума	+	–	+	+	–	Данные отсутствуют
Сжатие изображения	+	–	JPEG ($\leq 10\%$)	JPEG ($\leq 10\%$)	–	Данные отсутствуют
Фильтрация	Медианная, гауссовская, модовая	Гауссовская	–	–	ФНЧ	Данные отсутствуют
Обрезка	≤ 50	–	≤ 75	≤ 75	–	Данные отсутствуют

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о наличии инвариантности встроенных данных к рассмотренным преобразованиям. Кроме того, разработанный подход превосходит рассмотренные аналоги по большинству из оцениваемых параметров за исключением перекопирования [11–13, 16] и обрезки изображения [14, 15].

Полученные результаты позволяют отнести разработанный подход к маркированию текстовых данных к перцептивно невидимым подходам, отличающимся наличием инвариантности встроенных данных к основным операциям обработки изображений, а также к преобразованию формата тексто-

вых данных в изображение, содержащее текст, посредством применения операции «печать–сканирование».

Заключение

Проведенный анализ параметров встраивания и извлечения разработанного подхода к маркированию текстовых данных с существующими аналогами позволяет сделать вывод о возможности применения данного подхода для защиты текстовой информации от утечки и защиты авторских прав владельцев данных. Кроме того, робастность встроенного водяного знака к преобразованию формата текстовых данных позволяет осуществлять идентификацию не только

электронных, но и печатных копий исходного текстового документа.

В то же время наличие ошибок в процессе извлечения встроенных данных и небольшая емкость встраиваемой информации, представленной РВЗ. Ввиду этого снижение количества ошибок извлечения и повышение емкости встраивания являются направлением дальнейших исследований.

Литература

1. Через бумажные документы случается каждая десятая утечка конфиденциальных данных // Аналитический центр InfoWatch, 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.infowatch.ru/analytics/digest/15511> (дата обращения: 04.06.2019).
2. Alhindi H. Data Loss Prevention using document semantic signature / H. Alhindi, I. Traore, I. Woungang // International Conference on Wireless Intelligent and Distributed Environment for Communication. – 2018. – P. 75–99.
3. Wang C.-W. Data Loss Prevention system based on Big Data // 2nd International Conference on Artificial Intelligence: Techniques and Applications (AITA 2017). – 2017. – P. 292–298.
4. Stokes S. Digital copyright: law and practice. – Bloomsbury Publishing, 2019. – 297 p.
5. Eid A. A Tamper proofing text watermarking shift algorithm for copyright protection / A. Eid, A. Emran, A. Yahya // International Journal of Hybrid Information Technology. – 2018 – Vol. 11, No. 3. – P. 13–22.
6. Digital Watermarking Technique for Text Document Protection Using Data Mining Analysis / U. Khadam, M.M. Iqbal, M. Azam, S. Khalid // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 64955–64965.
7. Козачок А.В. Робастный водяной знак как способ защиты текстовых данных от утечки / А.В. Козачок, С.А. Копылов, М.В. Бочков // Защита информации. INSIDE (Санкт-Петербург). – 2018. – Т. 82, № 4. – С. 26–33.
8. Подход к извлечению робастного водяного знака из изображений, содержащих текст / А.В. Козачок, С.А. Копылов, Р.В. Мешеряков, О.О. Евсютин // Труды СПИИРАН (Москва). – 2018. – Т. 5(60). – С. 128–155.
9. Козачок А.В., Копылов С.А. Подход к внедрению робастного водяного знака в текстовые данные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ruscrypto.ru/resource/archive/rc2018/files/11_Kozachok_Kopylov.pdf, свободный (дата обращения: 05.02.2019).
10. Kozachok A.V. Text marking approach for data leakage prevention / A.V. Kozachok, S.A. Kopylov, A.A. Shelupanov, O.O. Evsutin // Journal of Computer Virology and Hacking Techniques. – 2019. DOI: 10.1007/s11416-019-00336-9 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11416-019-00336-9> (дата обращения: 26.06.2019)
11. Marking text features of document images to deter illicit dissemination / J.T. Brassil, S. Low, N.F. Maxemchuk, L. O’Gorman // Proceedings of the 12th IARP International Conference on Pattern Recognition, Vol. 3-Conference C: Signal Processing (Cat. no. 94CH3440-5). – 1994. – Vol. 2. – P. 315–319.
12. Electronic marking and identification techniques to discourage document copying / J.T. Brassil, S. Low, N.F. Maxemchuk, L. O’Gorman // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1995. – Vol. 13, No. 8. – P. 1495–1504.
13. Brassil J.T. Copyright protection for the electronic distribution of text documents / J.T. Brassil, S. Low, N.F. Maxemchuk // Proceedings of the IEEE. – 1999. – Vol. 87, No. 7. – P. 1181–1196.
14. Secure spread spectrum watermarking for multimedia / I.J. Cox, J. Kilian, F.T. Leighton, T. Shamoan // IEEE transactions on image processing. – 1997. – Vol. 6, No. 12. – P. 1673–1687.
15. Marking and detection of text documents using transform-domain techniques / Y. Liu, J. Man, E. Wong, S.H. Low // Security and Watermarking of Multimedia Contents. International Society for Optics, Photonics. – 1999. – Vol. 3657. – P. 317–328.
16. Huang D. Interword distance changes represented by sine waves for watermarking text images / D. Huang, H. Yan // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2001. – Vol. 11, No. 12. – P. 1237–1245.
17. Alattar A.M. Watermarking electronic text documents containing justified paragraphs and irregular line spacing / A.M. Alattar, O.M. Alattar // Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VI. T. 5306. International Society for Optics, Photonics. – 2004. – P. 685–696.

Козачок Александр Васильевич

Канд. техн. наук, сотрудник Академии
Федеральной службы охраны Российской Федерации
Приборостроительная ул., д. 35, г. Орел, Россия, 302034
Тел.: +7 (486-2) 54-99-33
Эл. почта: a.kozachok@academ.msk.rsnnet.ru

Копылов Сергей Александрович

Сотрудник Академии
Федеральной службы охраны Российской Федерации
Приборостроительная ул., д. 35, г. Орел, Россия, 302034
Тел.: +7 (486-2) 54-99-33
Эл. почта: gremlin.kop@mail.ru

Kozachok A.V., Kopylov S.A.

The approach to text electronic documents marking and its comparison with existing analogues

This article presents the experimental evaluation results of the developed approach to the text documents marking. The features of the watermark being formed are considered. A review of existing research in the field of text data marking was conducted, the advantages and drawbacks of the considered approaches are determined. The results of a comparative analysis of the embedding and extraction parameters of the developed approach with the considered analogues are presented. The directions of further research aimed at increasing the embedding capacity and accuracy of data extraction were determined.

Keywords: information security, text data marking, text steganography.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-52-60

References

1. InfoWatch. Every ninth leak of confidential data happens through paper documents. 2019. (In Russ.). Available at: <https://www.infowatch.ru/analytics/digest/15511> (Accessed: June 4, 2019).

2. Alhindi H., Traore I., Woungang I. Data Loss Prevention using document semantic signature. International Conference on Wireless Intelligent and Distributed Environment for Communication, 2018, pp. 75–99.
 3. Wang C.-W. Data Loss Prevention system based on Big Data. 2nd International Conference on Artificial Intelligence: Techniques and Applications (AITA 2017), 2017, pp. 292–298.
 4. Stokes S. Digital copyright: law and practice. *Bloomsbury Publishing*, 2019, 297 p.
 5. Eid A., Emran A., Yahya A. Tamper proofing text watermarking shift algorithm for copyright protection. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 13–22.
 6. Khadam U., Iqbal M.M., Azam M., Khalid S. Digital Watermarking Technique for Text Document Protection Using Data Mining Analysis. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 64955–64965.
 7. Kozachok A.V., Kopylov S.A., Bochkov M.V. Robust watermark as technique to text data leakage prevention. *Information security INSIDE*, 2018, vol. 82, no. 4, pp. 26–33. (In Russ.).
 8. Kozachok A.V., Kopylov S.A., Meshcheryakov R.V., Evsutin O.O., Tuan L.M. An approach to a robust watermark extraction from images containing text. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, vol. 60, no. 5, pp. 128–155 (in Russ.).
 9. Kozachok A.V., Kopylov S.A. The embedding approach to robust watermarking in text data. *RusCrypto-2018*, 2018. (In Russ.). Available at: http://www.ruscrypto.ru/resource/archive/rc2018/files/11_Kozachok_Kopylov.pdf (Accessed: February 5, 2019).
 10. Kozachok A.V., Kopylov S.A., Shelupanov A.A., Evsutin O.O. Text marking approach for data leakage prevention. *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques*, 2019. DOI: 10.1007/s11416-019-00336-9 Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11416-019-00336-9>. (Accessed: June 26, 2019).
 11. Brassil J.T., Low S., Maxemchuk N.F., O’Gorman L. Marking text features of document images to deter illicit dissemination. Proceedings of the 12th IARP International Conference on Pattern Recognition, Vol. 3-Conference C: Signal Processing (Cat. No. 94CH3440-5), 1994, vol. 2, pp. 315–319.
 12. Brassil J.T., Low S., Maxemchuk N.F., O’Gorman L. Electronic marking and identification techniques to discourage document copying. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1995, vol. 13, no. 8, pp. 1495–1504.
 13. Brassil J.T., Low S., Maxemchuk N.F. Copyright protection for the electronic distribution of text documents. *Proceedings of the IEEE*, 1999, vol. 87, no. 7, pp. 1181–1196.
 14. Cox I.J., Kilian J., Leighton F.T., Shamoon T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. *IEEE transactions on image processing*, 1997, vol. 6, no. 12, pp. 1673–1687.
 15. Liu Y., Man J., Wong E., Low S. Marking and detection of text documents using transform-domain techniques. *Security and Watermarking of Multimedia Contents. International Society for Optics, Photonics*, 1999, vol. 3657, pp. 317–328.
 16. Huang D., Yan H. Interword distance changes represented by sine waves for watermarking text images. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, vol. 11, no. 12, pp. 1237–1245.
 17. Alattar A.M., Alattar O.M. Watermarking electronic text documents containing justified paragraphs and irregular line spacing. *Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VI. T. 5306. International Society for Optics, Photonics*, 2004, pp. 685–696.
-

Alexander V. Kozachok

Candidate of Engineering,
Employee Academy of the Federal Guard Service
35, Priborostroitel'naya st., Orel, Russia, 302034
Phone: +7 (486-2) 54-99-33
Email: a.kozachok@academ.msk.rsnet.ru

Sergey A. Kopylov

Employee Academy of the Federal Guard Service
35, Priborostroitel'naya st., Orel, Russia, 302034
Phone: +7 (486-2) 54-99-33
Email: gremlin.kop@mail.ru

УДК 004.048:004.021

П.И. Банокин, Е.Е. Лунёва, А.А. Ефремов

Оценка профилей пользователей-экспертов социальной сети

Рассмотрены характеристики поведения интернет-троллей и дано обоснование необходимости оценки поведения влиятельных пользователей социальной сети. Представлен процесс создания профилей поведения пользователей-экспертов социальной сети для оценки их компетентности и степени принадлежности к классу пользователей-троллей. Создание профиля производится путем анализа сообщений пользователя и преобразования в векторы числовых значений. Дано описание архитектуры ансамблевого классификатора, используемого для оценки эмоционального тона сообщений. Проведена кластеризация профилей пользователей.

Ключевые слова: ансамблевый классификатор, пользователь-эксперт, профиль поведения, интернет-тролль, социальная сеть.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-61-66

В настоящее время социальные сети широко используются для высказывания мнений относительно фактов, людей, событий, продуктов или услуг. Анализ данных из социальных сетей позволяет решать широкий класс задач, в том числе при выполнении маркетинговых и социологических исследований, формировании политических прогнозов, а также применяется при оценке репутационных рисков человека или компании [1]. При этом сообщения некоторых пользователей в социальной сети могут быть направлены не столько на высказывание своего мнения, сколько на создание социальной провокации в публикациях, заинтересованных в своей большей узнаваемости и публичности. Наибольший интерес среди таких пользователей вызывают так называемые интернет-тролли.

Интернет-тролли – это пользователи социальных сетей, действия которых направлены на искажение общественного мнения, включая возбуждение агрессии или провоцирование панического поведения [2]. Мотивами совершения деструктивных действий таких пользователей могут быть психические расстройства, личная неприязнь или выполнение заказов для создания репутационного и экономического ущерба. Для достижения своих целей тролли создают сообщения с ложными фактами и явными или скрытыми оскорблениями, используют технологии манипулирования мнением [3].

Деятельность интернет-троллей может затруднить получение полезной информации из социальных сетей.

Большая интенсивность потока данных из социальных сетей обуславливает необходимость автоматизированного анализа, который включает в себя анализ количественных показателей активности пользователей в сети, таких как количество репостов, комментариев, упоминаний и т.д., а также анализ текстов сообщений. При этом важной задачей является поиск пользователей-экспертов или лидеров в заданной предметной области [1]. Значимость задачи идентификации пользователей-экспертов обуславливается тем, что именно данные пользователи задают тренд в оценивании или отношении к определенному факту, событию и т.п. Среди найден-

ных экспертов целесообразно определить пользователей, имеющих признаки поведения интернет-тролля. Также важной характеристикой найденного эксперта является предвзятость или непредвзятость мнения. Пользователь социальной сети со стойкими предубеждениями сохраняет свое явно выраженное отрицательное или положительное отношение к изучаемым явлениям в течение длительного времени. Эксперт с предвзятым мнением обращает меньше внимания на изменчивую природу изучаемого объекта и новые факты о нем. Классификация найденных экспертов по их поведению может повысить качество проводимых в дальнейшем исследований, в том числе социологических и маркетинговых.

Поведение пользователей можно оценить в ходе анализа текстов сообщений при помощи явных и неявных признаков. Явными признаками являются использование нецензурной лексики и оскорбительных выражений, а также устойчивое значение эмоционального тона. Неявные признаки могут включать в себя использование метафор, сравнений и маскировку нецензурных слов.

В работе [4] утверждается о возможности использования классификаторов текстовых данных для определения отдельных признаков поведения троллей. Для определения троллей могут быть использованы заранее установленные критерии поведения, среди которых можно выделить использование прописных букв, скорость ответа на комментарии, использование нецензурных слов [5]. Также возможным признаком поведения интернет-тролля является узкая специализация: его сообщения преимущественно посвящены одной теме, используется одинаковый набор хэш-тегов, эмоциональный тон сообщений ярко выражен и устойчив [5].

Целью работы является разработка подхода к созданию профилей поведения пользователей социальной сети Twitter и их последующего использования для выявления пользователей-троллей.

Классификация текстовых данных

Для классификации текстовых данных широкое применение нашли алгоритмы глубокого обучения на основе нейронных сетей. Часто используемыми архитектурами нейронной сети являются сверточная

сеть на основе многослойного персептрона и LSTM-сеть [6], которые в том числе используются для анализа эмоционального тона текста [7]. В зависимости от тренировочного набора данных, используемого способа кодирования текста точность алгоритмов варьируется от 76 до 95% [8].

Дополнительным способом повышения точности классификации является использование ансамбля классификаторов [9]. В состав ансамбля могут входить классификаторы, обученные на разных наборах данных или отличающиеся используемым алгоритмом классификации [9]. Ансамблевый классификатор формирует итоговую оценку путем пропорционального или непропорционального сложения оценок классификаторов [9]. Преимуществами ансамблевого классификатора являются возможность сочетать несколько алгоритмов машинного обучения, обновлять состояние ансамбля за счет добавления новых классификаторов по мере обновления обучающих выборок данных и исключения устаревших или неэффективных классификаторов.

Альтернативным способом повышения точности является совершенствование процесса предварительной обработки данных. В источнике [10] предлагается использовать расширенные векторные представления слов, дополненные значениями символов, из которых состоит слово. Также для повышения точности используются механизмы внимания совместно с нейронной сетью LSTM [11].

Ансамблевая архитектура выбрана авторами в качестве базовой архитектуры классификации ввиду ее расширяемости и возможности адаптации в условиях быстрого изменения лексики текстов, созданных пользователями социальных сетей.

Процесс классификации пользователей

Предложенный процесс классификации пользователя состоит из следующих стадий:

1. Загрузка данных по заданной предметной области из социальной сети, которая выполняется на основе заданных ключевых слов или хэш-тегов.

2. Поиск пользователей экспертов в соответствии с подходом [12, 13], основанным на анализе социального графа с использованием метода Боргатти и алгоритма Кендалла-Уэя.

3. Создание профилей поведения для пользователей-экспертов.

4. Вычисление меры разнообразия для каждого пользователя на основе созданного профиля.

Профиль поведения пользователя-эксперта

Поведенческий профиль пользователя социальной сети является структурой данных, хранящей вычисленные характеристики поведения на основе коллекции выбранных сообщений пользователя и его дискуссий. Авторы предлагают способ создания профиля поведения пользователя путем обработки выборки его сообщений $\mathbf{M} = \{m_1, m_2, \dots, m_s\}$, где s – количество элементов в выборке сообщений пользователя. Пусть профиль пользователя включает вектор характеристик поведения $\mathbf{D} = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, где n – количество характеристик. Каждая из характери-

стик является мерой разнообразия поведения пользователя. Предполагается, что эксперты с высоким значением меры разнообразия имеют более широкую сферу интересов и менее склонны к предвзятости. Профиль пользователя включает следующие характеристики:

1. d_1 – значение энтропии эмоционального тона сообщений пользователя. Энтропия вычисляется по формуле Шеннона $H = -\sum_i p_i \log_2 p_i$ [14] на основе

новой коллекции значений эмоционального тона сообщений пользователя, полученных с использованием ансамблевого классификатора.

2. d_2 – индекс лексического разнообразия MLTD [15], вычисленный для выборки \mathbf{M} сообщений пользователя. Если у пользователя отсутствуют собственные сообщения, индексу MLTD присваивается значение «0».

Также профиль сопровождается набором явных критериев поведения интернет-тролля, который можно представить в качестве вектора $\mathbf{t} = (t^{(1)}, t^{(2)}, \dots, t^{(k)})^T$, где k – количество критериев. Предлагается использовать следующие критерии:

1. t_1 – использование нецензурной лексики, значения «0» или «1».

2. t_2 – написание сообщений прописными буквами без учета аббревиатур. Значения «0» или «1».

Определение значения эмоционального тона

Для вычисления значения эмоционального тона предлагается использовать ансамблевый классификатор, построенный на основе двух классификаторов архитектуры CNN с символьным кодированием входных данных, и один классификатор архитектуры LSTM с кодированием входных данных в виде векторов слов GloVe [11]. Компоненты векторов слов, полученные в [16] в результате исполнения алгоритма GloVe на больших выборках текстовых данных, отражают эмоциональный тон, а также другие семантические характеристики слова. В табл. 1 приведена предварительная оценка эффективности классификаторов, проведенная авторами на тестовых выборках сообщений. Под эффективностью классификации понимается доля верно классифицированных сообщений.

Необходимо отметить, что для ансамбля классификаторов (см. табл. 1) не требуется тренировочный набор данных, так как он формируется из ранее обученных моделей классификаторов. При работе ансамблевого классификатора осуществляется проверка совпадений слов сообщения с коллекцией векторных представлений GloVe. При недостаточном числе совпадений (менее 50%) используется только классификатор № 2.

За счет использования ансамблевой архитектуры точность классификации тестового набора из 100 сообщений превысила 77%, полученных авторами в работе [7] при использовании только LSTM-классификатора.

Таблица 1

Классификаторы текстовых данных			
Классификатор	Архитектура нейронной сети	Тренировочный набор данных	Доля верно классифицированных сообщений, %
1	LSTM	Kaggle Sentiment140	72
2	CNN	Kaggle Sentiment140	78
3	CNN	Imdb Sentiment Dataset	76
4	Ансамбль классификаторов 1, 2, 3		87

Экспериментальный анализ

Для оценки эффективности подхода к созданию профилей поведения пользователей социальной сети Twitter была проведена серия из 20 экспериментов. Каждый эксперимент проводился на 180–320 заранее размеченных сообщениях из социальной сети Twitter. При этом каждая выборка состояла из сообщений пользователей-троллей и пользователей-экспертов с высоким уровнем компетентности. Разметка данных из социальной сети Twitter производилась авторами работы. Средняя эффективность классификатора составила 83,5%.

В табл. 2 приведены примеры сообщений, классифицированных верно и с ошибкой.

Для обозначения результатов классификации используется знак «+» для положительно классифицированных сообщений и «-» для отрицательно классифицированных сообщений. Ошибку классификации сообщения № 5 можно объяснить употреблением слов в переносном значении и отсутствием достаточного количества примеров подобных речевых оборотов в тренировочном наборе данных. Несмотря на ошибки отдельных классификаторов в примерах № 2–4, использование ансамбля классификаторов обеспечивает верный итоговый результат.

В качестве гипотезы H_0 выбрано утверждение о принадлежности пользователя к классу троллей, в качестве альтернативной гипотезы H_1 – о принадлежности пользователя к классу экспертов. Тогда эффективность предлагаемого подхода оценивалась по доле троллей, ошибочно принятых за экспертов (т.е. ошибка первого рода), а также по доле экспертов, неверно идентифицированных в качестве троллей (т.е. ошибка второго рода).

В табл. 3 приведены результаты по каждому эксперименту.

Среднее значение ошибки первого рода составило 12,50%, среднее значение ошибки второго рода составило 13,72%.

Далее представлены результаты эксперимента № 4. В табл. 4 приведена информация о пользователях и характеристики их профилей.

Количество анализируемых сообщений для каждого пользователя составило 20. Идентификаторы пользователей-троллей не указаны в связи с возможными репутационными рисками из-за публикации данных экспериментов в открытом доступе. По-

лученные результаты профилей пользователей были подвергнуты кластерному анализу с использованием алгоритма K-Means [17]. В результате выполнения алгоритма три пользователя-тролля включены в отдельный кластер (рис. 1).

Ошибка первого рода для данного эксперимента составила 0%, ошибка второго рода составила 50%.

Таблица 2

Результаты классификации текстовых сообщений

№	Сообщение	Истинный эмоциональный тон	Результат классификации (классификаторы 1, 2, 3, ансамбль)
1	Charlatan is EXACTLY that: misrepresenting one's skills Перевод: Шарлатан – это в точности тот, кто обесценивает чужие способности	–	–, –, –, –
2	These two leveraged-loan lifers from Eaton Vance see bright days ahead despite the negative headlines https:// Перевод: Эти два должителя на рынке инвестиций в кредиты из корпорации Eaton Vance смотрят в будущее с оптимизмом, несмотря на негативные заголовки в новостях	+	+, +, –, +
3	Flashpoints of 2018: Serena Williams blows her top in the US Open final Перевод: Ключевые моменты 2018: Серена Уильямс устроила скандал в финале «Открытого чемпионата» США	+	+, +, –, +
4	I always wondered whose photos they are using for all those fake followers. Here is your answer... Перевод: Меня всегда интересовало, чьи фотографии они используют для всех этих фейковых аккаунтов своих фолловеров. А здесь ответ на этот вопрос...	–	–, +, –, –
5	OMG. @TheOnion strikes again! Now you hack into @Bloomberg and planting satire? OMG. You guys are on fire this morning! Перевод: О боже! @TheOnion наносит ответный удар! Теперь вы взламываете @Bloomberg и распространяете сатиру по их мотивам. Ну и задали вы жару сегодня утром!	+	–, +, –, –

Таблица 3

Результаты экспериментов			
Номер	Кол-во пользователей	Ошибка первого рода, %	Ошибка второго рода, %
1	15	25,00	9,09
2	15	0,00	20,00
3	10	20,00	0,00
4	9	0,00	50,00
5	16	0,00	23,08
6	13	25,00	33,33
7	12	0,00	11,11
8	15	10,00	10,00
9	14	16,67	12,05
10	15	0,00	9,09
11	15	50,00	18,18
12	10	25,00	0,00
13	10	0,00	0,00
14	10	0,00	16,67
15	11	0,00	12,50
16	12	25,00	12,50
17	14	0,00	10,00
18	11	0,00	14,29
19	14	20,00	0,00
20	9	33,33	12,50
Ср. значения	12,50	12,50	13,72

Таблица 4

Характеристики профилей поведения пользователей			
Номер	Пользователь	Профиль поведения (d_1, d_2)	Соответствие признакам поведения тролля (t_1, t_2)
1	@nntaleb	(0,9557; 0,8428)	(0,0)
2	@roguerad	(0,7798; 0,9714)	(0,0)
3	@HarryDCrane	(0,9303; 0,9143)	(0,0)
4	Троль1	(0,6850; 1)	(0,1)
5	Троль2	(0,4244; 0,2429)	(0,0)
6	Троль3	(0; 0)	(1,1)
7	Троль4	(0,7112; 0,7429)	(1,1)
8	Троль5	(1; 0,6143)	(1,1)
9	Троль6	(0,5027; 0,4571)	(1,1)

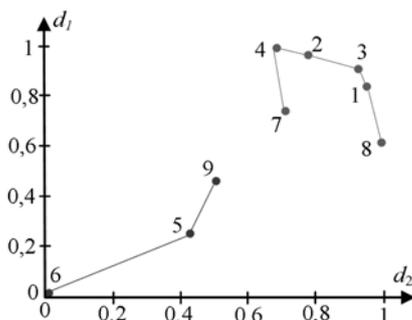


Рис. 1. Результат кластеризации поведенческих профилей

Результаты кластеризации свидетельствуют о том, что половина интернет-троллей (50%) выделена в отдельный кластер. Наличие интернет-троллей в одном кластере с экспертами объясняется способностью троллей копировать поведение обычных пользователей.

Результаты экспериментального анализа позволяют сделать вывод об эффективности ансамблевого классификатора текстовых данных для эмоционального тона сообщений социальной сети Twitter. Предложенный подход построения и оценки профилей пользователей позволяет идентифицировать явных интернет-троллей. При этом можно отметить низкие средние значения ошибок первого и второго рода, что составляет преимущество подхода.

Заключение

Представленный в статье подход к созданию профилей поведения обеспечивает повышение эффективности идентификации пользователей-экспертов за счет исключения интернет-троллей и экспертов с предвзятым мнением из выборки пользователей. Достигнутые показатели точности классификации подтверждают практическую значимость разработанного классификатора. Однако в некоторых случаях ошибки первого и второго рода достигают 50%, что характерно для выборок данных с сообщениями троллей, копирующих поведение обычных пользователей. Данные значения ошибок могут быть сокращены за счет повышения точности классификации текстовых данных посредством использования механизмов внимания, которые позволят сконцентрировать анализ эмоционального тона на отдельных частях сообщения, а также за счет расширения набора характеристик профиля пользователя, отличающих действия эксперта от действий копирующего его поведение тролля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №17-07-00034 А).

Литература

1. Сравнение способов идентификации пользователей социальных сетей, являющихся экспертами в заданной предметной области / Е.Е. Лунова, А.А. Ефремов, Е.А. Кочегурова, П.И. Баночкин, В.С. Замятина // Системы управления и информационные технологии. – 2017. – № 4(70). – С. 63–68.
2. What is an internet troll? // The Guardian [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.theguardian.com/technology/2012/jun/12/what-is-an-internet-troll>, свободный (дата обращения: 01.12.2018).
3. Exposing Paid Opinion Manipulation Trolls / T. Mihaylov, I. Koychev, G. Georgiev, P. Nakov // Proceedings of the International Conference Recent Advances in Natural Language Processing. – Hissar, Bulgaria: INCOMA Ltd. Shoumen, 2015. – P. 443–450.
4. Chu T. Comment abuse classification with deep learning. / T. Chu, K. Jue, M. Wang // Stanford University [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://web.stanford.edu/class/cs224n/reports/2762092.pdf>, свободный (дата обращения: 01.12.2018).
5. Dollberg S. The Metadata Troll Detector: semester work. – Zurich, Switzerland, 2015. – 18 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://pub.tik.ee.ethz.ch/students/2014-HS/SA-2014-32.pdf>, свободный (дата обращения: 01.12.2018).
6. Kim Y. Convolutional Neural Networks for Sentence Classification // Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. – Strouds-

burg, USA: Association for Computational Linguistics. – 2014. – P. 1746–1752.

7. Банокин П.И., Ефремов А.А., Лунева Е.Е., Кочегурова Е.А. Исследование применимости рекуррентных сетей lstm в задаче поиска пользователей-экспертов социальных сетей // Программные системы и вычислительные методы. – 2017. – № 4. – С. 53–60.

8. Hong J. Sentiment analysis with deeply learned distributed representations of variable length texts / J. Hong, M. Fang. Технический отчет. – Stanford, USA: Stanford University, 2015. – 9 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://cs224d.stanford.edu/reports/HongJames.pdf>, свободный (дата обращения: 01.12.2018).

9. Roy A., Kapil P., Basak K., Ekbal A. An Ensemble approach for Aggression Identification in English and Hindi Text // Proceedings of the First Workshop on Trolling, Aggression and Cyberbullying (TRAC-2018). – Santa Fe, New Mexico, USA: Association for Computational Linguistics, 2018. – P. 66–73.

10. Yu L.-C., Wang J., Lai K.R., Zhang X. Refining word embeddings for sentiment analysis // Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. – Stroudsburg, USA: ACL, 2017. – P. 545–550.

11. Wang Y., Huang M., Zhu X., Zhao L. Attention-based LSTM for aspect-level sentiment classification // Proceedings of the 2016 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. – Austin, Texas: ACL, 2016. – P. 606–615.

12. Лунева Е.Е., Ефремов А.А., Банокин П.И. Способ идентификации пользователей-экспертов в социальных сетях // Программные системы и вычислительные методы. – 2018. – № 4. – С. 86–101.

13. Luneva E.E., Zamyatina V.S., Banokin P.I., Yefremov A.A. Estimation of social network user's influence in a given area of expertise // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803, № 1. – P. 1–6.

14. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – №27. – P. 379–423.

15. Koizumi R. Relationships Between Text Length and Lexical Diversity Measures: Can We Use Short Texts of Less than 100 Tokens? // Vocabulary Learning and Instruction. – 2012. – №1. – P. 60–69.

16. Pennington J., Socher R., Manning C.D. Pennington J. GloVe: Global Vectors for Word Representation // Stanford NLP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://nlp.stanford.edu/projects/glove/>, свободный (дата обращения: 01.12.2018).

17. Hartigan J.A. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm / J.A. Hartigan, M.A. Wong // Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics). – 1979. – № 28. – P. 100–108.

Банокин Павел Иванович

Ассистент инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 2, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-63-86
Эл. почта: pavel805@gmail.com

Лунева Елена Евгеньевна

Доцент ИШИТР НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 2, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-63-86
Эл. почта: lee@tpu.ru

Ефремов Александр Александрович

Ст. преп. ИШИТР НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 2, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-63-86
Эл. почта: alexyefremov@tpu.ru

Banokin P.I., Luneva E.E., Yefremov A.A.

Classification of Twitter social network expert users

The behavior of social network trolls and the necessity of influential users' behavior evaluation are considered. The process of behavior profiles creation and analysis is presented. Behavior profiles are created by analysis of text messages and stored as real-value vectors. Ensemble classifier is used for evaluation of text data sentiment. Results of behavior profiles clustering are shown and discussed.

Keywords: ensemble classifier, expert user, behavior profile, internet troll, social network.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-61-66

References

1. Luneva E.E., Yefremov A.A., Kochegurova E.A., Banokin P.I., Zamyatina V.S. The comparison of identification methods of social network users regarded as subject-matter experts. *Control Systems and Information Technology*, 2017, no. 4(70), pp. 63–68 (In Russ.).

2. What is an internet troll? *The Guardian*. Available at: <https://www.theguardian.com/technology/2012/jun/12/what-is-an-internet-troll> (Accessed: December 01, 2018).

3. Mihaylov T., Koychev I., Georgiev G., Nakov P. Exposing Paid Opinion Manipulation Trolls. *Proceedings of the International Conference Recent Advances in Natural Language Processing*, 2015, pp. 443–450.

4. Theodora Chu, Kylie Jue, and Max Wang. Comment abuse classification with deep learning. *Stanford University*. Available at: <https://web.stanford.edu/class/cs224n/reports/2762092.pdf> (Accessed: December 01, 2018).

5. Dollberg S. *The Metadata Troll Detector: semester work*, Swiss Federal University of Technology Zurich, 2015, 18 p. Available at: <https://pub.tik.ee.ethz.ch/students/2014-HS/SA-2014-32.pdf> (Accessed: December 01, 2018).

6. Kim Y. Convolutional Neural Networks for Sentence Classification. *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 2014, pp. 1746–1752.

7. Banokin P.I., Yefremov A.A., Luneva E.E., Kochegurova E.A. Study of the applicability of LSTM recurrent networks in the task of finding users expert social networks // *Software systems and computational method*, 2017, no. 4, pp. 53–60 (in Russ.).

8. Hong J., Fang M. *Sentiment analysis with deeply learned distributed representations of variable length texts*. Stanford University, 2015, 9 p. Available at: <https://cs224d.stanford.edu/reports/HongJames.pdf>, свободный (Accessed: December 01, 2018).

9. Roy A., Kapil P., Basak K., Ekbal A. An Ensemble approach for Aggression Identification in English and Hindi Text. *Proceedings of the First Workshop on Trolling, Aggression and Cyberbullying (TRAC-2018)*, 2018, pp. 66–73.

10. Yu L.-C., Wang J., Lai K.R., Zhang X. *Refining word embeddings for sentiment analysis*. Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2017, pp. 545–550.

11. Wang Y., Huang M., Zhu X., Zhao L., *Attention-based LSTM for aspect-level sentiment classification*. Proceedings of the 2016 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2016, pp. 606–615.

12. Luneva E.E., Efremov A.A., Banokin P.I. A method of social network expert users identification. *Software systems and computational methods*, 2018, no. 4, pp. 86–101 (In Russ.).

13. Luneva E.E., Zamyatina V.S., Banokin P.I., Yefremov A.A. *Estimation of social network user's influence in a given area of expertise*. Journal of Physics: Conference Series, 2017, vol. 803, no. 1, pp. 1–6.

14. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, no. 27, pp. 379–423.

15. Koizumi R. Relationships Between Text Length and Lexical Diversity Measures: Can We Use Short Texts of Less than 100 Tokens? *Vocabulary Learning and Instruction*, 2012, no. 1, pp. 60–69.

16. Pennington J., Socher R., Manning C.D. GloVe: Global Vectors for Word Representation. *Stanford NLP*. Available at: <https://nlp.stanford.edu/projects/glove/> (Accessed: December 01, 2018).

17. Hartigan J.A.; Wong M.A. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, 1979, no. 28, pp. 100–108.

Pavel I. Banokin

Assistant Professor,
School of Information Systems and Robotics,
National Research Tomsk Polytechnic University
2, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-63-86
Email: pavel805@gmail.com

Elena E. Luneva

Candidate of Engineering, Associate Professor,
School of Information Systems and Robotics,
National Research Tomsk Polytechnic University
2, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-63-86
Email: lee@tpu.ru

Alexander A. Yefremov

Senior Lecturer,
School of Information Systems and Robotics,
National Research Tomsk Polytechnic University
2, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID 0000-0001-8149-3641
Phone: +7 (382-2) 60-63-86
Email: alexyefremov@tpu.ru

УДК 004.932:519.652

М.Ю. Катаев, С.М. Бутин

Сравнительный анализ методов повышения пространственного разрешения спутниковых данных LANDSAT-8

Проведено сравнение нескольких методов повышения пространственного разрешения спутниковых изображений, полученных по данным спектрорадиометра LandSat-8. Сравняются методы Brovey, SFIM, MLT и HPF с помощью критериев корреляции, RMSE и ERGAS. Также для сравнения использовался нормализованный относительный индекс растительности, который в сравнении со статистическими критериями показал важные моменты в сохранении спектральной информации методами повышения разрешения. В работе использовались реальные спутниковые данные Landsat-8.

Ключевые слова: спутниковые изображения, пространственное разрешение, методы обработки, повышение пространственного разрешения.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-67-71

Многоспектральные и гиперспектральные изображения состоят из множества спектральных каналов с высоким спектральным разрешением от видимой до инфракрасной области спектра. Широкий спектральный диапазон в сочетании с высоким спектральным и средним пространственным разрешением (10–100 м) позволяет с определенной точностью выделять и классифицировать типы поверхности. Кроме этих датчиков, на орбите находятся спектральные приборы, которые доказали свою эффективность при решении практических и научных задач (например, MODIS, Landsat). Эти приборы охватывают широкую пространственную область при измерениях, и их относительно низкое пространственное разрешение не позволяет решать задачи пространственного контроля территории. Для этой цели разработаны методики, которые позволяют повысить пространственное разрешение этих измерений за счет комплексирования данных разных спутников или использования панхроматических каналов, имеющих, как правило более высокое пространственное разрешение.

Проблемы, которые несет в себе низкое и среднее пространственное разрешение, связаны с тем, что внутри площади пикселя может быть расположено несколько типов поверхности (например, вода, песок, лес и др.). Большинство классических классификаторов терпят неудачу при дешифрации пикселей спутникового изображения, где наблюдается смешивание двух и более типов поверхности.

Одним из вариантов решения задачи дешифрирования спектральных данных, заложенных в спутниковых изображениях, является задача спектрального разделения на отдельные компоненты (unmixing). В этой задаче изображение разделяется на сцены, на уровне субпикселей и может предоставить информацию только о пропорциях тех или иных типов поверхности, для которых известны характеристики отражения разнообразных типов поверхности. Однако поскольку пространственное положение типов поверхности в пикселе остается неизвестным, спектральное разделение не приводит к заметному улучшению пространственного разрешения.

Известна методика повышения пространственного разрешения за счет многомерного интерполирования (2D, 3D), и она часто применяется на практике, но не является распространенной, так как сказывается влияние рельефа на точность интерполяции, а значит и на качество повышения пространственного разрешения. Существует обширный класс методик [1–11], решающий задачи повышения пространственного разрешения, в основе которых лежит использование панхроматического канала (panchromatic или PAN). Заметим, что существует два вида построения изображений, это синтезированный RGB, когда каждому цвету соответствует тот или иной спектральный канал, а также индексные изображения, построенные на основе вычисленных предварительно индексов, например, вегетационного индекса NDVI. Важной особенностью методов, которые позволяют повышать пространственное разрешение, является нарушение спектральной природы каналов, что ведет к значительным погрешностям при вычислении индексов.

В данной статье рассматривается несколько методов повышения пространственного разрешения и ищутся методы, которые менее всего нарушают спектральную структуру каналов, что позволяет рассчитать индекс (в данной работе – вегетационный NDVI) с минимальной погрешностью.

Методики повышения пространственного разрешения изображения

Спутники дистанционного зондирования Земли предлагают широкий спектр измеренных изображений с различными характеристиками: пространственными, спектральными, радиометрическими и временными. Изображения, получаемые методами дистанционного зондирования, доступны для использования научным сообществом в цифровой форме. В каждом пикселе изображения, которое известно для того или иного спектрального канала, фиксируется отраженное от поверхности Земли солнечное излучение (в области 0,4–2,5 мкм) или уходящее излучение Земли (в области 3–12 мкм). В результате измерений на изображении фиксируются образы, которые соответствуют разнообразным типам поверхности.

Обзор различных статей по теме [1–16] позволил выделить большую группу методов, разработанных за последние два десятилетия, такие как MLT-алгоритм, модифицированный алгоритм «Брови» (MB), High-Pass «Фильтр» (HPF), алгоритм на основе сглаживающего фильтра модуляции (SFIM), метод главных компонент (PCA), методика интенсивность–оттенок–насыщенность (IHS) и т.д. Все вышеперечисленные методы могут реализовать повышение пространственного разрешения мультиспектральных изображений с помощью изображений с высоким разрешением и сохранить спектральную информацию, правда, в определенной степени. Отметим, что каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, поэтому нами в этой статье оценивается применимость различных методов для изображений спутникового прибора Landsat-8.

Причины выбора методов в основном заключаются в следующем: 1) все они математически схожие, например, все они представляют собой статистические методы, а не методы, связанные с цветом RGB; 2) они просты и удобны в использовании; 3) они могут быть выполнены с любым количеством выбранных входных спектральных каналов.

Метод Brovey Transform

Метод заключается в слиянии видимых спектральных каналов (для Landsat-8 это 30 м пространственное разрешение) с панхроматическим каналом (15 м). Метод позволяет получить визуальные изображения после синтеза (например, используя каналы 4-3-2) с хорошим визуальным качеством, однако сильно искажает спектральную информацию. Метод связан с вычислениями, представленными в формуле (1) для i -го канала видимой спектральной области:

$$B_{\text{brovey}_i} = a \cdot \sum_j \sum_j \frac{B_{\text{low}_i} \cdot B_{\text{high}}}{\sum_{i=1}^n B_{\text{low}_i}}, \quad i=1, \dots, 3, \quad (1)$$

где B_{brovey_i} получено путем слияния изображений низкого разрешения low_i с панхроматическим изображением high , i – номер канала, j – строка пикселей изображения, k – столбец пикселей изображения. В данной работе было принято решение о добавлении коэффициента коррекции a , по причине высокого искажения информации после алгоритма (коэффициент взят равным 3).

Метод HPF Transform

HPF (high-pass filter) – это метод слияния с использованием высокочастотного фильтра. При использовании этого метода повышение разрешения осуществляется за счет переноса высокочастотных составляющих панхроматического канала на спектральные каналы. Производится по формуле (2):

$$B_{\text{HPF}_i} = \sum_j \sum_k \frac{B_{\text{low}_{ijk}} + FB_{\text{high}_{jk}}}{2}, \quad i=1, \dots, 6, \quad (2)$$

где B_{HPF_i} получено слиянием изображения низкого разрешения $B_{\text{low}_{ijk}}$ с изображением $FB_{\text{high}_{jk}}$. Изображение $FB_{\text{high}_{jk}}$ преобразуется из панхроматического изображения, профильтрованного высокочастотным фильтром.

Метод SFIM Transform

В основе метода лежит сглаживающий фильтр на основе модуляции интенсивности. В отличие от метода HPF, в методе используется низкочастотный фильтр (low-pass filter), который преобразует панхроматическое изображение в изображение B_{mean} . Для преобразования используется уравнение (3):

$$B_{\text{SFIM}_i} = \sum_j \sum_k \frac{B_{\text{low}_{ijk}} \times B_{\text{high}_{jk}}}{B_{\text{mean}_{jk}}}, \quad i=1, \dots, 6, \quad (3)$$

где B_{SFIM_i} получено умножением изображения с низким разрешением на изображение высокого разрешения и делением на изображение высокого разрешения, которое преобразуется низкочастотным фильтром с размером матрицы 5×5 .

Метод MLT Transform

Данный метод объединяет изображение низкого разрешения с изображением высокого разрешения с учетом коэффициентов коррекции a и b . Вычисления проводятся по формуле (4):

$$B_{\text{MLT}_i} = \sqrt{\sum_j \sum_k a \cdot B_{\text{low}_{ijk}} \times b \cdot B_{\text{high}_{jk}}}, \quad (4)$$

где B_{MLT_i} получено слиянием изображения низкого разрешения $B_{\text{low}_{ijk}}$ с изображением высокого разрешения $B_{\text{high}_{jk}}$. Коэффициенты коррекции a и b подбираются вручную или с помощью оптимизационных процедур (что существенно усложняет методику, ввиду большого количества пикселей спутникового изображения).

Критерии сравнения изображений

При использовании методов повышения пространственного разрешения важно выяснить точность получения необходимой информации и насколько один метод отличается от другого, чтобы выбрать лучший. Также авторов статьи волновал вопрос, связанный с сохранением спектральной информации в итоговых изображениях, чтобы переходить к расчету индексов (например, вегетационного NDVI), но уже с более высоким пространственным разрешением, нежели исходное.

Для сравнения изображений будут использоваться следующие критерии:

1. Среднее значение цвета пикселя.
2. Корреляция с исходным снимком.
3. Средняя квадратическая ошибка ($RMSE$, (5)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_m \sum_n (B_{\text{low}} - B_{\text{high}})^2}{MN}}, \quad (5)$$

где B_{low} и B_{high} – значения интенсивности в исходном и итоговом снимках, MN – размер изображения (высота на ширину). Идеальное значение 0, по результатам других исследований [1–7] значения обычно располагаются в диапазоне от 200 до 1500.

4. ERGAS (Relative Global Dimensional Synthesis Error) – это индекс качества, чувствительный к среднему смугу и изменению динамического диапазона.

Рассчитывается по формуле (6):

$$ERGAS = 100d \sqrt{\frac{1}{m_\lambda} \sum_{m_\lambda} \left(\frac{RMSE_k}{\mu_k} \right)^2}, \quad k=1...m_\lambda, \quad (6)$$

где μ_k – среднее значение интенсивности в исходном изображении, RMSE – средняя квадратичная ошибка, k – номер канала, m_λ – количество каналов. Идеальное значение 0, по результатам других исследований [1–7] значения в норме располагаются в диапазоне от 2 до 10.

Также для оценки вычислялся вегетационный индекс NDVI по формуле (7):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (7)$$

где NIR – значение интенсивности света в ближнем инфракрасном диапазоне, RED – значение интенсивности света в красном канале. Значения индекса для растительности лежат в диапазоне от –1 (отсутствие растительности) до 1 (полная растительность).

Результаты исследования

В качестве данных для тестирования были взяты спутниковые изображения Landsat-8 от 12 июля 2018 г. Из общей площади изображения снимков была вырезана область, расположенная в окрестности коммунального моста через р. Томь на окраине г. Томска. Данная местность была выбрана из-за своей наглядности и различных типов поверхности, таких как вода, городская застройка, длинный мост и поля с растительностью. Также 12 июля был солнечный, безоблачный день.

Методы примерно дают одинаковые результаты, ближе всего схожесть с оригинальным изображением показывает метод MLT, но связано это с меньшим внедрением информации панхроматического канала (рис. 1).

Также были проведены расчеты вегетационного индекса для каждого метода повышения пространственного разрешения (SFIM, HPF, Brovey и MLT), чтобы увидеть качество расчета NDVI для каждого метода. Методы Brovey и MLT дают заметные искажения по сравнению с оригинальным NDVI (таблица).



Рис. 1. Сравнение исходного изображения (а) Landsat-8 (30 м на пиксель) и результатов (б) повышения пространственного разрешения (15 на пиксель, метод HPF)

В таблице приведены вычисленные значения критериев сравнения изображений рассматриваемых в статье методов для каналов 2 (синий), 3 (зеленый), 4 (красный).

Сравнение изображений по критериям

(B2 (синий)= 9517,038; B3 (зеленый)= 8804,142; B4 (красный)= 7945,118; B5 (NIR)= 14203,957)

Метод/ Канал	Среднее	Корреляция	RMSE	ERGAS
B2 Brovey	9166,069	0,8735	553,9698	2,9104
B3 Brovey	8481,16	0,9094	525,0714	2,9819
B4 Brovey	7658,881	0,9346	536,1449	3,3740
B5 Brovey	8526,165	0,9200	6643,2649	23,3852
B2 HPF	9516,975	0,8079	539,6692	2,8352
B3 HPF	8802,384	0,8423	560,7662	3,1846
B4 HPF	7944,643	0,8844	631,9626	3,9770
B5 HPF	14122,370	0,9532	1726,3444	6,0769
B2 SFIM	9518,708	0,7918	585,3967	3,0755
B3 SFIM	8806,776	0,8369	582,3145	3,3070
B4 SFIM	7954,05	0,8841	639,1968	4,0225
B5 SFIM	14113,108	0,9469	1840,8793	6,4801
B2 MLT	8955,489	0,9161	649,2033	3,4107
B3 MLT	8614,335	0,9398	357,7712	2,0318
B4 MLT	8183,157	0,9447	442,7167	2,7860
B5 MLT	10690,124	0,9131	4990,8668	17,5685
NDVI исход.	0,2325	1	0	0
NDVI Brovey	0,0341	0,9574	0,2125	45,7155
NDVI HPF	0,2305	0,9569	0,0586	12,6028
NDVI SFIM	0,2297	0,9578	0,0578	12,4439
NDVI MLT	0,1203	0,9573	0,1526	32,8356

Анализ результатов

По результатам работы методов для спектральных каналов Landsat-8 можно сделать вывод, что для синтезированных изображений (спектральные каналы 4, 3, 2) повышение разрешения осуществляется лучше с помощью метода Brovey, но отметим, что остальные методы имеют приблизительно схожие результаты. Картина полностью меняется при исследовании вегетационного индекса NDVI. Метод Brovey дал худший результат, далее следует метод MLT, а лучшими являются методы SFIM и HPF. Все потому, что метод Brovey основан на том, что панхроматический канал является объединением трех видимых каналов и не включает в себя ближний инфракрасный диапазон, а именно этот канал необходим для расчета вегетационного индекса. На основе всего этого можно сделать вывод, что лучшие результаты в плане визуального улучшения и сохранения спектральной информации снимков дают методы SFIM и HPF.

Заключение

В дистанционном зондировании метод повышения пространственного разрешения спутниковых изображений является полезным инструментом для практического использования. Для этого используются панхроматические изображения (PAN) с высоким пространственным разрешением с мультиспектральными изображениями с более низким пространственным разрешением. При этом для одних приложений важна именно визуальная составляющая высокого пространственного разрешения изображений, а для других – сохранение спектральной информации в полученном мультиспектральном изображении. К настоящему времени разработано много методов PAN-улучшения пространственного разрешения с одновременным сохранением спектральных свойств. В данной статье предпринята попытка исследовать несколько методов повышения пространственного разрешения с сохранением спектральных свойств, в основе которых находятся лишь арифметические операции. К таким можно отнести следующие методы: Брови (Brovey), мультипликативный (MLT), модуляции (HFM) и SFIM-преобразования. Проведенные расчеты показали, что лучше сохранение спектральной информации снимков дают методы SFIM и HPF без потери качества при повышении пространственного разрешения.

Данное исследование проведено в Центре космического мониторинга Земли ТУСУРа.

Литература

1. Palubinskas G. Multi-resolution, multi-sensor image fusion: General fusion framework / G. Palubinskas, P. Reinartz // Proc. Joint Urban Remote Sens. Event. – 2011. – P. 313–316.
2. Knorn J. Land cover mapping of large areas using chain classification of neighboring Landsat satellite images // Remote Sens. Environment. – 2009. – P. 957–964.
3. Zhou J. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data / J. Zhou, D.L. Civco,

J.A. Silander // Int. J. Remote Sens. – 1998. – Vol. 19, No. 4. – P. 743–757.

4. Wu H. Pixel-based image fusion using wavelet transform for SPOT and ETM+ image / H. Wu, Y. Xing // Proc. IEEE Int. Conf. Progr. Informat. Comput. – 2010. – P. 936–940.

5. Zhang J. Remote sensing research issues of the National Land Use Change Program of China / J. Zhang, Y. Zhang // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. – 2007. – Vol. 62, No. 6. – P. 461–472.

6. Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics / C. Thomas, T. Ranchin, L. Wald, J. Chaussois // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2008. – Vol. 46, No. 5. – P. 1301–1312.

7. Adjustable model-based fusion method for multispectral and panchromatic images / L. Zhang, H. Shen, W. Gong, H. Zhang // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern. – 2012. – Vol. 42, No. 6. – P. 1693–1704.

8. Pohl C. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and application / C. Pohl, J.L. Van Genderen // International Journal of Remote Sensing. – 1998. – Vol. 19. – C. 823–854.

9. Park S.C. Super-resolution image reconstruction: A technical overview / S.C. Park, M.K. Park, M.G. Kang // IEEE Signal Process. Mag. – 2003. – Vol. 20, no. 3. – P. 21–36.

10. Image super-resolution via sparse representation / J. Yang, J. Wright, T. Huang, Y. Ma // IEEE Trans. Image Process. – 2010. – Vol. 19, No. 11. – P. 2861–2873.

11. Joshi M.V. Super-resolution imaging: Use of zoom as a cue / M.V. Joshi, S. Chaudhuri, R. Panuganti // Image Vis. Comput. – 2004. – Vol. 22, No. 14. – P. 1185–1196.

12. Zoom-based superresolution reconstruction approach using prior total variation / M.K. Ng, H. Shen, S. Chaudhuri, A.C. Yau // Opt. Eng. – 2007. – Vol. 46, No. 12. – P. 1–11.

13. Huang B. Spatiotemporal reflectance fusion via sparse presentation / B. Huang, H. Song // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2012. – Vol. 50, No. 10. – P. 3707–3716.

14. Two-step sparse coding for the pan-sharpening of remote sensing images / C. Jiang, H. Zhang, H. Shen, L. Zhang // IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. – 2014. – Vol. 7, No. 5. – P. 1792–1805.

15. Aharon M. K-SVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation / M. Aharon, M. Elad, A. Bruckstein // IEEE Trans. Signal Process. – 2006. – Vol. 54, No. 11. – P. 4311–4322.

16. Duda T. Unsupervised classification of satellite imagery: Choosing a good algorithm / T. Duda, M. Canty // Int. J. Remote Sens. – 2002. – Vol. 23, No. 11. – P. 2193–2212.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ)

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), научный руководитель Центра космического мониторинга ТУСУРа

Вершинина ул., 74, г. Томск, Россия, 634045

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85

Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Бутин Сергей Михайлович

Магистрант ТУСУРа

Вершинина ул., 74, г. Томск, Россия, 634045

Тел.: +7-952-802-24-54

Эл. почта: mrserblu@gmail.com

Kataev M.Yu., Butin S.M.

Comparative analysis of the methods of increasing the spatial resolution of satellite data LANDSAT-8

The area of multispectral and hyperspectral methods of sounding the atmosphere and the surface of the Earth is a constantly growing area of application of remote sensing data. The presence in the signal of a large number of spectral channels (wide spectral range), high spectral resolution, allows to detect and classify various types of surface in the observed satellite image. The main problem of multispectral and hyperspectral data is that the spatial resolution of such measurements can vary from several to tens of meters. In addition, numerous factors associated with optical imperfections, atmospheric scattering, lighting effects (geometry of the position of the Sun and the axis of sight relative to the observed territory) and sensor noise also cause deterioration in the quality of the image. This paper discusses the most popular methods for improving the spatial resolution of satellite data and conducts their detailed comparative analysis. The processing of real satellite data Landsat-8 for the territory near Tomsk is given.

Keywords: satellite images, spatial resolution, satellite data processing methods.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-67-71

References

1. Palubinskas G., Reinartz P., Multi-resolution, multi-sensor image fusion: General fusion framework. *Proc. Joint Urban Remote Sens. Event*, 2011, pp. 313–316.
2. Knorn J., Land cover mapping of large areas using chain classification of neighboring Landsat satellite images. *Remote Sens. Environ.*, 2009, vol. 113, no. 5, pp. 957–964.
3. Zhou J., Civco D. L., Silander J. A. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. *Int. J. Remote Sens.*, 1998, vol. 19, no. 4, pp. 743–757.
4. Wu H., Xing Y. Pixel-based image fusion using wavelet transform for SPOT and ETM+ image. *Proc. IEEE Int. Conf. Progr. Informat. Comput.*, 2010, pp. 936–940.
5. Zhang J., Zhang Y. Remote sensing research issues of the National Land Use Change Program of China. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2007, vol. 62, no. 6, pp. 461–472.
6. Thomas C., Ranchin T., Wald L., Chaussot J. Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2008, vol. 46, no. 5, pp. 1301–1312.

7. Zhang L., Shen H., Gong W., Zhang H. Adjustable model-based fusion method for multispectral and panchromatic images. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, 2012, vol. 42, no. 6, pp. 1693–1704.

8. Pohl C., Van Genderen J.L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and application. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, pp. 823–854.

9. Park S.C., Park M.K., Kang M.G. Super-resolution image reconstruction: A technical overview. *IEEE Signal Process. Mag.*, 2003, vol. 20, no. 3, pp. 21–36.

10. Yang J., Wright J., Huang T., Ma Y. Image super-resolution via sparse representation. *IEEE Trans. Image Process.*, 2010, vol. 19, no. 11, pp. 2861–2873.

11. Joshi M.V., Chaudhuri S., Panuganti R. Super-resolution imaging: Use of zoom as a cue. *Image Vis. Comput.*, 2004, vol. 22, no. 14, pp. 1185–1196.

12. Ng M.K., Shen H., Chaudhuri S., Yau A.C. Zoom-based superresolution reconstruction approach using prior total variation. *Opt. Eng.*, 2007, vol. 46, no. 12, pp. 1–11.

13. Huang B., Song H. Spatiotemporal reflectance fusion via sparse presentation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2012, vol. 50, no. 10, pp. 3707–3716.

14. Jiang C., Zhang H., Shen H., Zhang L. Two-step sparse coding for the pan-sharpening of remote sensing images. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2014, vol. 7, no. 5, pp. 1792–1805.

15. Aharon M., Elad M., Bruckstein A. K-SVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2006, vol. 54, no. 11, pp. 4311–4322.

16. Duda T., Canty M. Unsupervised classification of satellite imagery: Choosing a good algorithm. *Int. J. Remote Sens.*, 2002, vol. 23, no. 11, pp. 2193–2212.

Mikhail Yu. Kataev

Doctor of Engineering, Professor,

Department of Automated Control Systems (ACS),

Scientific Leader of the Center for Space Monitoring

Tomsk State University of Control Systems

and Radio Electronics (TUSUR)

74, Vershinin st., Tomsk, Russia, 634045

Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85

Email: kmy@asu.tusur.ru

Sergey M. Butin

Master student TUSUR

74, Vershinin st., Tomsk, Russia, 634045

Phone: +7-952-802-24-54

Email: mrserblu@gmail.com

УДК 004.896

Б.В. Ширяев, А.Ю. Ющенко, А.В. Безрук

Алгоритм автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем с использованием искусственных нейронных сетей

Работа посвящена проблеме визуального контроля при производстве СВЧ МИС. Рассматривается подход к автоматическому визуальному контролю с использованием искусственных нейронных сетей. Нейронная сеть производит одновременный анализ микрофотографии СВЧ МИС, полученной в автоматическом режиме, и чертежа её фотошаблона, получает информацию о степени дефектности изготовленной СВЧ МИС. Таким образом, повышается скорость визуального контроля СВЧ МИС без потери качества детектирования дефектов.

Ключевые слова: автоматизация, СВЧ МИС, свёрточные нейронные сети.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-72-76

Визуальный контроль при производстве СВЧ МИС заключается в контроле качества изготавливаемых СВЧ МИС по их внешнему виду с использованием специальных оптических приборов [1]. Изготовленная СВЧ МИС по визуальному признаку оценивается в нескольких категориях, наиболее важные из которых точность повторения фотошаблона, качественный анализ поверхностей элементов СВЧ МИС и отсутствие повреждений и загрязнений. В результате анализа степени дефектности выносится общий вердикт о годности СВЧ МИС по внешнему виду.

Автоматизация визуального контроля заключается в создании программного продукта, который повышает скорость и качество детектирования дефектов СВЧ МИС. Для сохранения интеллектуального уровня распознавания дефектов в программном продукте визуального контроля в качестве анализирующего модуля была использована искусственная нейронная сеть.

Алгоритм автоматизированного визуального контроля

Алгоритм оценки степени дефектности СВЧ МИС построен на сравнении её микрофотографии, полученной в автоматическом режиме, с чертежом фотошаблона в электронном формате (далее – чертёж), который применяется для её изготовления. В идеальном случае чертёж и микрофотография СВЧ МИС должны полностью совпадать, в реальности они имеют незначительные отличия из-за особенности технологии изготовления и контроля: искажённая форма элементов [2], рассовмещение слоёв, механические повреждения (царапины, касания зондов), недостаточное разрешение камеры визуального контроля и др. (рис. 1).

Общая последовательность алгоритма оценки дефектности сведена к выполнению следующих этапов:

- 1) поиск двух точек совмещения, заранее указанных в алгоритме визуального контроля;
- 2) расчёт масштаба, положения и состояния чертежа с использованием найденных координат точек совмещения на микрофотографии СВЧ МИС и их зафиксированного положения на чертеже;

- 3) растеризация векторного чертежа с заливкой областей;

- 4) преобразование цветной микрофотографии в изображение в оттенках серого;

- 5) сквозное выделение областей анализа из изображения и его растрированного чертежа с заливкой. Области подготавливаются на этапе настройки алгоритма;

- 6) дробление полученных областей на участки, размер которых соответствует входу нейронной сети. Участки перекрывают друг друга по площади для повышения качества распознавания. Дробление позволяет уйти от общей микрофотографии СВЧ МИС к анализу отдельных её участков, сравнивая их с подобными деталями чертежа;

- 7) получение оценки дефектности нейронной сетью для каждой области п. 6;

- 8) анализ полученных значений, устранение случайных ошибок.

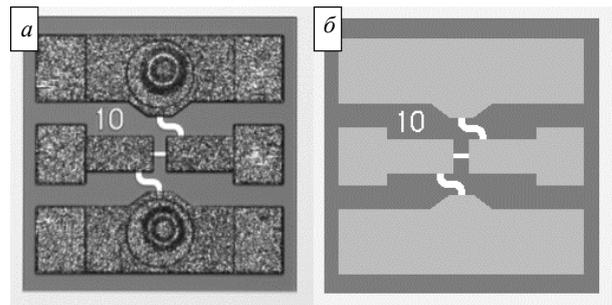


Рис. 1. Изображение готовой СВЧ МИС (а) и растрированный чертеж фотошаблона (б)

Результатом обработки микрофотографии является маска дефектов, наложение которой на микрофотографию СВЧ МИС показывает его дефектные области.

Поиск точек совмещения

Для оценки степени дефектности СВЧ МИС по микрофотографии следует перед поиском дефектов совместить её с чертежом. Рисунок чертежа совмещается по двум заранее определённым точкам совмещения (рис. 2). Используемая в программе структура данных точек совмещения содержит ин-

формацию о приблизительном положении области их поиска на микрофотографии, координаты их положения на чертеже и малое цветное изображение для осуществления поиска расчётом коэффициента различия участков.

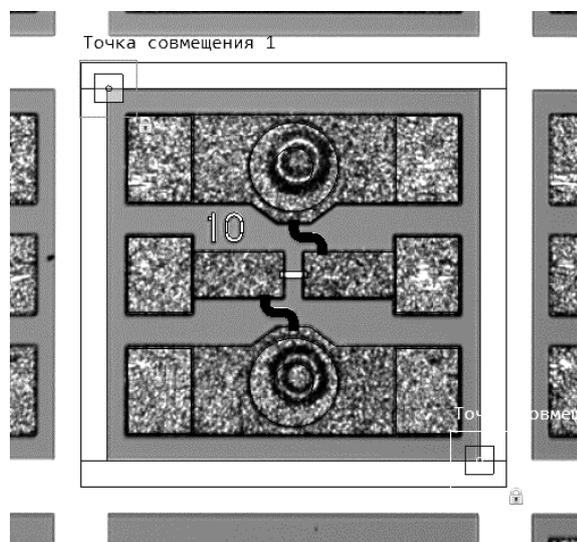


Рис. 2. Совмещение чертежа и микрофотографии СВЧ МИС по двум точкам совмещения

Определение положения точек совмещения $(x; y)$ производится путём поиска минимального коэффициента различия между изображением точки совмещения и участком области поиска [3]:

$$K_{x,y} = \sum (|R_{x+i,y+j} - R_{i,j}^{TC}| + |G_{x+i,y+j} - G_{i,j}^{TC}| + |B_{x+i,y+j} - B_{i,j}^{TC}|), \quad (1)$$

где $R_{x+i,y+j}$, $G_{x+i,y+j}$, $B_{x+i,y+j}$ – компоненты цвета RGB-формата с диапазоном значений $[0; 255]$ области поиска точки совмещения; $R_{i,j}^{TC}$, $G_{i,j}^{TC}$, $B_{i,j}^{TC}$ – компоненты цвета RGB-формата с диапазоном значений $[0; 255]$ изображения окрестности точки совмещения.

Расчёт состояния чертежа

Состояние чертежа описывается масштабом, положением, вертикальным и горизонтальным зеркальным отражением относительно микрофотографии СВЧ МИС. Для упрощения задачи угловая составляющая была исключена на стадии съёмки микрофотографии.

Формулы расчёта масштаба чертежа:

$$S_x = \frac{I_{x1} - I_{x2}}{F_{x1} - F_{x2}}, \quad S_y = \frac{I_{y1} - I_{y2}}{F_{y1} - F_{y2}}, \quad (2)$$

где I_x, I_y – координаты точек совмещения на микрофотографии (в пикселях); F_x, F_y – координаты точек совмещения на чертеже фотошаблона (в относительных единицах) [4].

Расчёт положения чертежа относительно микрофотографии производится из известных координат одной точки и масштаба:

$$P_x = I_x - F_x \cdot S_x, \quad P_y = I_y - F_y \cdot S_y. \quad (3)$$

Масштаб может иметь отрицательное значение, что свидетельствует о зеркальном отражении чертежа фотошаблона.

Растреризация векторного чертежа

Чертёж фотошаблона представляет собой цифровой файл векторного изображения в формате .dxf [5] и содержит информацию обо всём фотошаблоне и всех его слоях. Для проведения визуального контроля требуются определённые слои и участки чертежа, которые участвуют в формировании внешнего вида конкретной СВЧ МИС. Для этого требуется предварительная подготовка чертежа: выбор набора необходимых слоёв и извлечение конкретной СВЧ МИС, подвергающейся визуальному контролю. После расчёта состояния чертежа производится его растреризация из векторного вида в заданное разрешение и положение.

Растреризация чертежа необходима для определения областей с идентичными областями текстур и для обозначения мест с эквивалентными визуальными характеристиками.

Преобразование микрофотографии

Особенностью используемой искусственной нейронной сети является то, что на вход нейрона входного слоя сети требуется подавать значения в пределах от 0 до 1. Однако микрофотографии, полученные в автоматическом режиме, представлены в виде матрицы пикселей, цвет которых принадлежит цветовому пространству RGB 8 бит на канал – 256 градаций яркости для каждого канала (от 0 до 255). Для преобразования цвета пикселя используется следующая формула:

$$F = \frac{r \cdot R + g \cdot G + b \cdot B}{255}, \quad (4)$$

где R, G, B – компоненты цветового пространства RGB; r, g, b – коэффициенты преобразования цветового пространства. В соответствии со стандартом «Recommendation ITU-R BT.709-6» [6] коэффициенты принимают следующие значения соответственно: $r = 0,2126$; $g = 0,7152$; $b = 0,0722$.

Выделение области анализа

При получении микрофотографий производится автоматическая съёмка СВЧ МИС с захватом частей соседних СВЧ МИС (см. рис. 2). Это позволяет СВЧ МИС находиться в центре микрофотографии даже при возникновении незначительного смещения.

Введение шага выделения области анализа позволяет выделить СВЧ МИС из микрофотографии и устранить возможное смещение при автоматической съёмке. Область анализа привязана к безразмерным координатам фотошаблона, что позволяет переносить размер области на микрофотографию с сохранением всех важных элементов СВЧ МИС. Положение и размер области анализа рассчитываются исходя из положения и масштаба чертежа фотошаблона.

Разбиение области анализа

Полученные области анализа микрофотографии и растреризованного чертежа фотошаблона сквозным методом разбиваются на участки (каждый полученный участок микрофотографии СВЧ МИС соответ-

стует участку растрованного фотошаблона). Размер каждого участка 29×29 пикселей и равен размеру входного слоя искусственной нейронной сети (рис. 3). Участки перекрывают друг друга на половину своего размера (14 пикселей), это позволяет оценить правильность работы искусственной нейронной сети, оценивая степень дефектности смежных участков на этапе обработки полученных оценок дефектности.

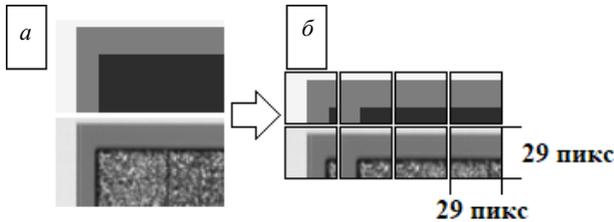


Рис. 3. Пример сквозного разбиения области анализа на участки: исходные области анализа (а), полученные пары участков (б)

Определение степени дефектности

Большинство нейронных сетей по обработке изображений [7–9] имеют всего один вход, на который подаётся участок изображения. Для предложенного алгоритма визуального контроля СВЧ МИС требуется сравнение её микрофотографии с чертежом. В статьях [10, 11] рассматривается обучаемая искусственная нейронная сеть с двумя входами для определения дальности расположения объектов на стереоизображении. Показано, что нейронная сеть принимает на вход два участка разных изображений, обрабатывает их в одном цикле, делает на их основе заключение и обучается.

С учётом [10, 11] разработана архитектура искусственной нейронной сети для автоматизированного визуального контроля с двумя входами: первый вход для участка изображения СВЧ МИС, второй вход для участка растрованного чертежа. Далее следует параллельное преобразование изображений набором свёрточных слоёв, слияние результатов с использованием объединяющего слоя и заключительная обработка данных полносвязными слоями до получения на выходе одного значения. Все слои имеют в качестве функции активации сигмоиду [12]. Пример архитектуры нейронной сети приведён на рис. 4.

Искусственная нейронная сеть предварительно обучена на этапе подготовки алгоритма на наборе пар изображений: участки микрофотографии и чертежа сопоставлены с числовым значением степени дефектности этой пары изображений. Метод обучения – метод обратного распространения ошибки [13–14]. Уход от анализа всей СВЧ МИС к анализу её участков позволяет использовать искусственную нейронную сеть для определения степени дефектности СВЧ МИС других топологий.

После преобразования нейронной сетью области анализа, разбитой на участки, получается двумерный массив вещественных чисел в диапазоне от 0 до 1, где 0 – отсутствие дефектов, 1 – полностью дефектный участок или разные участки.

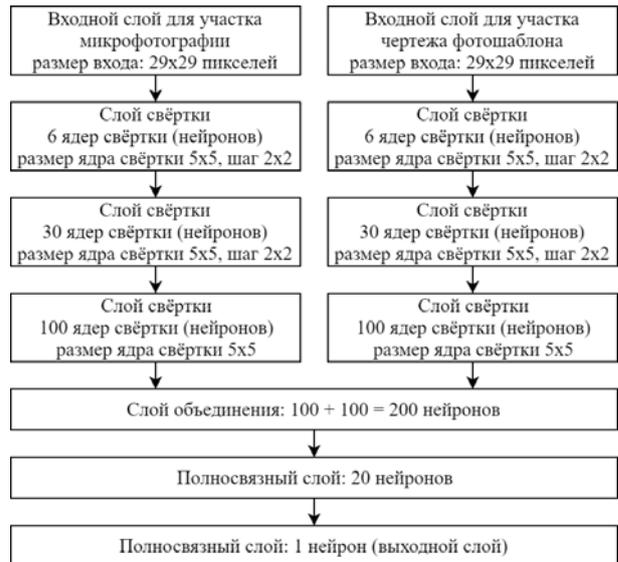


Рис. 4. Архитектура нейронной сети с двумя входами для автоматизированного визуального контроля

Этап обработки полученных оценок дефектности

Заключительным этапом работы алгоритма является обработка двумерного массива степени дефектности. Для каждого соседних значений проверяются 2 условия: сумма значений соседних участков по вертикали и горизонтали не должна быть меньше значения степени дефектности центрального участка; разница степени дефектности 2 соседних участков по вертикали и горизонтали не должна превышать 0,5. Введение этих условий позволяет выявить случайные ошибки расчётов дефектности и повторно провести оценку проблемного участка со смещением сетки разбиения.

Масштабирование двумерного массива до размера микрофотографии позволяет получить маску дефектов (рис. 5). Маска дефектов указывает места скопления дефектов на СВЧ МИС, это помогает выявлять причины дефектов и вносить предложения по улучшению технологического маршрута изготовления СВЧ МИС для уменьшения количества брака.

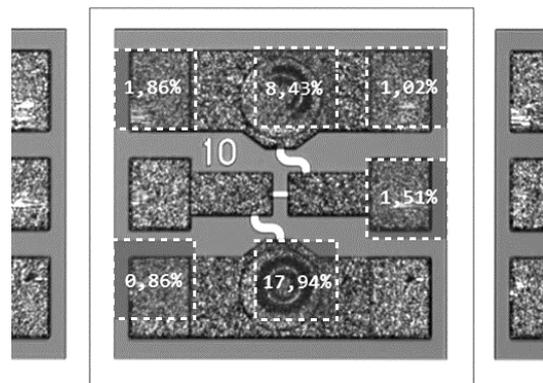


Рис. 5. Полученная маска дефектов, совмещённая с микрофотографией СВЧ МИС

Заключение о качестве внешнего вида полученной СВЧ МИС выносится с учётом предварительно

установленного порога допустимой степени дефектности как всей микрофотографии СВЧ МИС, так и отдельных её участков. СВЧ МИС считается негодной при превышении порога дефектности хотя бы одним участком микрофотографии. Величина порога дефектности определяется на этапе отладки алгоритма для достижения минимального количества ошибок при определении годности. Значение порога находится в пределах от 0 (все аномалии изображения считать дефектом) до 1 (все аномалии допустимы).

Испытание алгоритма автоматизированного визуального контроля

На основе алгоритма автоматизированного визуального контроля разработан программный продукт, позволяющий настроить алгоритм, обучить нейронную сеть и проводить визуальный контроль.

Для обучения искусственной нейронной сети сформированы обучающий и тестовый наборы. Обучающий набор содержит 20 микрофотографий дефектных СВЧ МИС – максимальное разнообразие дефектов с годными участками. Таким образом, нейронная сеть получит набор дефектных и недефектных областей. Также набор содержит пары несоответствующих участков микрофотография – чертёж. В общей сложности обучающий набор содержит около 10 000 пар участков. Тестовый набор содержит 428 микрофотографий полупроводниковой пластины, на которой ранее был проведён ручной визуальный контроль. Ошибка обучения искусственной нейронной сети – доля неправильно отбракованных чипов (ошибки первого и второго рода [15]) от всего числа чипов в тестовом наборе.

В результате обучения нейронной сети, архитектура которой изображена на рис. 4, получены следующие ошибки обучения на тестовом наборе (рис. 6).

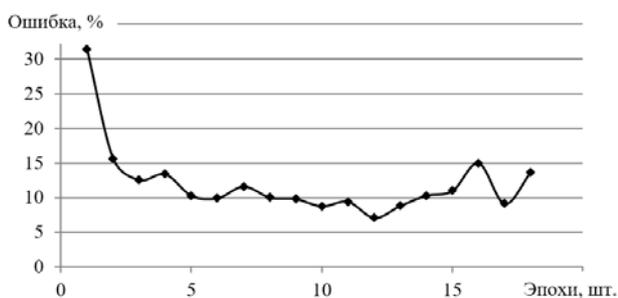


Рис. 6. График зависимости ошибки детектирования дефектов от количества эпох обучения на тестовом наборе

Среднее время обучения эпохи – 34 мин. Среднее время расчёта тестового набора – 7,3 мин. Минимальная ошибка 7,1%.

Для определения пригодности нейронной сети сравнивать участки микрофотографий СВЧ МИС с участком растрованного чертежа фотошаблона сформирован обучающий набор из 30 микрофотографий: 3 топологии по 10 микрофотографий дефектных СВЧ МИС. В общей сложности обучающий набор содержит около 14 000 пар. Тестовый набор содержит 3 топологии СВЧ МИС по 428 мик-

рофотографий. Для каждой группы тестового набора вычисляется независимая ошибка обучения (рис. 7).

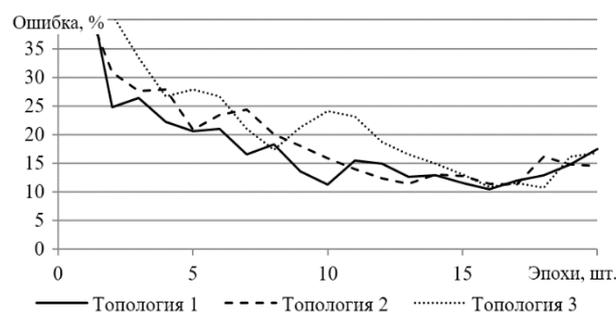


Рис. 7. График зависимости ошибки определения годности МИС СВЧ от количества эпох обучения для 3 топологий

Среднее время обучения эпохи – 47 мин. Среднее время расчёта тестового набора – 22 мин. Минимальная средняя ошибка для 3х топологий 11%.

Заключение

Рассмотренный в данной статье алгоритм автоматизированного визуального контроля позволяет сравнивать микрофотографию с векторным изображением чертежа фотошаблона и оценивать степень дефектности поверхности СВЧ МИС. Алгоритм использует искусственную нейронную сеть с двумя входами. Разработан программный продукт на основе предложенного алгоритма.

Тестирование программного продукта при производстве СВЧ МИС в АО «НИИПП» показало, что средняя скорость процесса автоматизированного визуального контроля по сравнению с ручным увеличивается в 4–5 раз. Совпадение результатов предложенного алгоритма и ручного визуального контроля составляет 89%.

Литература

1. Груздов В.В. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ-электронике / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. – М.: Техносфера, 2016. – 328 с.
2. Test method standard microcircuits [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf>, свободный (дата обращения: 20.05.2019).
3. Forsyth D.A. Computer Vision: A Modern Approach / D.A. Forsyth, J. Ponce. – Pearson Education Limited, 2015. – 792 p.
4. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
5. DXF Reference [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_2012_pdf_dxf-reference_enu.pdf, свободный (дата обращения: 20.05.2019).
6. Recommendation ITU-R BT.709-6. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. – 2015. – P. 19.
7. Изотов П.Ю. Технология реализации нейросетевого алгоритма в среде CUDA на примере распознавания рукописных цифр / П.Ю. Изотов, С.В. Суханов, Д.Л. Головашкин // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 243–251.
8. Друки А.А. Применение свёрточных нейронных сетей для выделения и распознавания автомобильных

номерных знаков на изображениях со сложным фоном // Изв. ТПУ. – 2014. – Т. 324, № 5. – С. 85–92.

9. Dan Cireşan. Multi-column Deep Neural Networks for Image Classification / Dan Cireşan, Ueli Meier, Jürgen Schmidhuber [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1202.2745.pdf>, свободный (дата обращения: 21.05.2019).

10. Jure Žbontar Computing the Stereo Matching Cost with a Convolutional Neural Network / Jure Žbontar, Yann LeCun // Computer Vision Foundation. – 2015. – P. 1592–1599.

11. Luo W. Efficient Deep Learning for Stereo Matching / W. Luo, A.G. Schwing, R. Urtasun // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – P. 5695–5703.

12. Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines*. – 3rd Ed. – Pearson, 2008. – 936 p.

13. Heaton J. *Introduction to Neural Networks for C#*. – 2nd Ed. – Heaton Research, Inc., 2008. – 428 p.

14. Нейронная сеть – обучение ИНС с помощью алгоритма обратного распространения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://robocraft.ru/blog/algorithm/560.html>, свободный (дата обращения: 20.05.2019).

15. Серафинович Л.П. *Планирование эксперимента: учеб. пособие*. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2006. – 128 с.

2. Test method standard microcircuits. Available at: <http://scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf> (accessed: May 21, 2019).

3. Forsyth D.A., Ponce J. *Computer Vision: A Modern Approach*. Pearson Education Limited, 2015, 792 p.

4. Shapiro L. G., Stockman G.C. *Computer Vision*. Pearson, 2001, 608 p.

5. DXF Reference. Available at: http://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_2012_pdf_dxf-reference_enu.pdf (accessed: May 21, 2019).

6. Recommendation ITU-R BT.709-6. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange, 2015, 19 p.

7. Isotov P.Y., Sukhanov S.V., Golovashkin D.L. Technology of implementation of neural network algorithm in CUDA environment at the example of handwritten digits recognition. *Computer optics*, 2010, vol. 34, no. 2, pp. 243–251 (in Russ.).

8. Druki A.A. Application of convolutional neural networks for extraction and recognition of car number plates on images with complex background. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 5, pp. 85–92 (in Russ.).

9. Cireşan D., Meier U., Schmidhuber J. Multi-column Deep Neural Networks for Image Classification. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1202.2745.pdf> (accessed: May 21, 2019).

10. Žbontar J., LeCun Y. Computing the Stereo Matching Cost with a Convolutional Neural Network. *Computer Vision Foundation*, 2015, pp. 1592–1599.

11. Luo W., Schwing A.G., Urtasun R. Efficient Deep Learning for Stereo Matching. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 5695–5703.

12. Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines*. Pearson, 3rd Ed., 2008, 936 p.

13. Heaton J. *Introduction to Neural Networks for C#*. Heaton Research, 2nd Ed., 2008, 428 p.

14. Nejrnnaya set – obuchenie INS s pomoshch'y algoritma obratnogo rasprostraneniya [Neural network – training NN using the back propagation algorithm]. Available at: <http://robocraft.ru/blog/algorithm/560.html> (accessed: May 21, 2019). (in Russ.).

15. Serafinovich L.P. *Planirovanie eksperimenta: Uchebnoe posobie* [Experiment Planning: Tutorial]. Tomsk: Tomskij mezhvuzovskij centr distancionnogo obrazovaniya, 2006, 128 p. (in Russ.).

Ширяев Борис Владимирович

Аспирант Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Программист Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов (АО «НИИПП»)
Красноармейская ул., д. 99а, г. Томск, Россия, 634034
Тел.: +7-961-886-75-42
Эл. почта: shiryayev_bv@niipp.ru

Ющенко Алексей Юрьевич

Канд. техн. наук, нач. отд. АО «НИИПП»
Красноармейская ул., д. 99а, г. Томск, Россия, 634034
Эл. почта: yushenko_ay@niipp.ru

Безрук Алексей Владимирович

Нач. измерит. участка отд. АО «НИИПП»
Красноармейская ул., д. 99а, г. Томск, Россия, 634034
Эл. почта: bezruk_av@niipp.ru

Shiryayev B.V., Yushchenko A.Yu., Bezruk A.V. Algorithm for automated visual inspection of monolithic integrated circuits using neural networks

The article describes the problem of visual control in the production of MMIC. The algorithm for automated visual control is implemented using neural networks. The neural network performs a parallel analysis of micrograph and photo-mask device. Then it outputs information about the defectiveness of the device. Thus, the speed of visual control of MMIC increases without losing the quality of defect detection.

Keywords: automation, MMIC, convolutional neural networks.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-72-76

References

1. Gruzдов V.V., Kolkovskij YU.V., Koncevoj YU.A. *Kontrol novyh tekhnologij v tverdotelnoj SVCh elektronike* [Control of new technologies in solid-state microwave electronics]. Moscow, Technosphere, 2016. 328 p. (in Russ.).

Boris V. Shiryayev

Postgraduate student, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Programmer Research Institute of Semiconductor Devices (JSC «RISD»)
99a, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: +7-961-886-75-42
Email: shiryayev_bv@niipp.ru

Aleksey Yu. Yushchenko

Candidate of Engineering, Head of Department
Research Institute of Semiconductor Devices (JSC «RISD»)
99a, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634034
Email: yushenko_ay@niipp.ru

Aleksey V. Bezruk

Head of Measurement Department
Research Institute of Semiconductor Devices (JSC «RISD»)
99a, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634034
Email: bezruk_av@niipp.ru

УДК 681.5.03

А.В. Цавнин, С.В. Ефимов, С.В. Замятин

Корневой подход к синтезу параметров ПИД-регулятора, гарантирующий отсутствие перерегулирования в переходной характеристике системы управления

Предложен метод устранения в системе перерегулирования за счет выбора настроечных коэффициентов классического ПИД-регулятора таким образом, чтобы обеспечить вещественные значения для полюсов передаточной функции замкнутой системы управления с колебательным объектом второго порядка. Получены аналитические выражения, определяющие допустимые диапазоны значений настроечных параметров, было проведено моделирование системы управления для произвольного объекта в среде Matlab.

Ключевые слова: система управления, ПИД-регулятор, нули, полюса, перерегулирование.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-77-82

При разработке и внедрении систем управления технологическими процессами к ним предъявляются требования, определяющие качество производимой продукции. Одним из таких требований может являться наличие перерегулирования в контурах систем управления. Например, в контуре управления уровнем воды в барабане котла незначительное превышение управляемой величины ведет к срабатыванию системы противоаварийной защиты [1].

Начиная с 70-х годов XX в. проведены многочисленные исследования в области корневых подходов к синтезу систем управления как отечественными, так и зарубежными специалистами. Ряд работ посвящен разработке подходов, обеспечивающих технологические переходные процессы как с некоторым минимально допустимым значением перерегулирования [2, 3], так и без перерегулирования, в основе которых лежат как алгебраические критерии, так и частотные [4–7]. В работе [8] получены правила взаимного расположения нулей и полюсов передаточной функции замкнутой системы управления, гарантирующие монотонный переходный процесс. Несмотря на то, что на основе всевозможных критериев сформулирован целый ряд методов и подходов к синтезу регуляторов различной структуры и проведены их сравнительные анализы в контексте различных объектов управления [9–14], задача настройки регуляторов, обеспечивающих нулевое перерегулирование в системах управления, остается актуальной и в настоящее время. Кроме того, стоит обратить внимание на тот факт, что методы синтеза регуляторов, представленные в [2] и [9–14], а также ряд общеизвестных методов, таких как Циглера–Никольса, CHR, Коэна–Куна и др. позволяют получить определенные численные решения, но не дают представления о всей области допустимых значений коэффициентов регуляторов, что требуется для корректировки значений параметров, обусловленной изменяющимися условиями функционирования. Говоря, в частности, о методе последовательной коррекции, то для него неточное знание параметров объекта повысит порядок замкнутой системы, что

также может внести нежелательный эффект в динамику конечного процесса.

Постановка задачи

Пусть задана система управления, представленная на рис. 1, где P – ПИД-регулятор с передаточной функцией $W_{PID}(s) = \frac{Ds^2 + Ks + I}{s}$, а D, K и I – настроечные коэффициенты дифференцирования, пропорциональности и интегрирования соответственно. ОУ – объект управления.

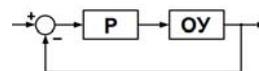


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Пусть передаточная функция объекта управления имеет вид

$$W(s) = \frac{K_P}{s^2 + 2\alpha s + \alpha^2 + \omega^2},$$

где α, β – действительная и мнимая составляющие комплексно-сопряженных полюсов объекта управления, K_P – коэффициент усиления объекта управления.

Ставится задача определить настроечные параметры ПИД-регулятора, обеспечивающие отсутствие перерегулирования.

Предлагаемый подход

В [8] предложена и доказана теорема, определяющая правила взаимного расположения нулей и полюсов передаточной функции (ПФ) замкнутой системы управления, обеспечивающие монотонную неубывающую переходную характеристику:

1. Каждому вещественному нулю z_i требуется вещественный полюс λ_i , такой что $\lambda_i > z_i$.

2. Каждой паре комплексно-сопряженных нулей $-\delta \pm j\beta$, располагающихся в отрицательной комплексной полуплоскости, требуется три отрицательных вещественных полюса λ_1, λ_2 и λ_3 , удовлетворяющих условиям $-\delta - |\beta| < \lambda_2 < -\delta + |\beta|$, $\lambda_1 - \lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_3$, или два отрицательных веществен-

ных полюса λ_1 и λ_2 , удовлетворяющих условию $\lambda_1 + \lambda_2 > 2\delta$.

3. Оставшиеся полюсы принимаются отрицательными и вещественными и располагаются произвольно в отрицательной комплексной полуплоскости.

В данном случае замкнутая система управления содержит только нули ПИД-регулятора, и их расположение определяется его настроечными параметрами D, K и I .

Используя вышеизложенные правила, сформируем требования к значениям настроечных параметров регулятора.

В силу того, что теорема доказана относительно нулей с отрицательной вещественной частью, то ограничим значения настроечных коэффициентов регулятора исключительно положительными вещественными значениями.

Согласно [8] для решения задачи устранения перерегулирования необходимо, чтобы все полюса ПФ системы были вещественными. Определим, при каких значениях настроечных параметров регулятора полюса ПФ замкнутой системы принимают отрицательные вещественные значения.

ПФ замкнутой системы примет вид

$$W_{CL}(s) = \frac{DK_P s^2 + KK_P s + IK_P}{s^3 + (2\alpha + DK_P)s^2 + (\alpha^2 + \omega^2 + KK_P)s + IK_P}$$

Заменим DK_P , KK_P и IK_P на D' , K' и I' соответственно. Тогда характеристическое уравнение замкнутой системы примет вид

$$s^3 + (2\alpha + D')s^2 + (\alpha^2 + \omega^2 + K')s + I' = 0.$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы представляет собой кубическое уравнение. Известно, что для того, чтобы корни уравнения принимали вещественные значения, необходимо, чтобы дискриминант уравнения был больше нуля. Запишем выражение для дискриминанта характеристического уравнения в матричной форме [16]. Для уравнения порядка $n=3$ порядок матрицы определителя будет $2n-1=5$, а выражение для ее определителя примет вид

$$D_S(\alpha, \omega, K', I', D') = (2\alpha + D')^2 (\omega^2 + \alpha^2 + K')^2 - 27I'^2 - 4I'(2\alpha + D')^3 - 4(\omega^2 + \alpha^2 + K')^3 + I'(36\alpha + 18D')(\omega^2 + \alpha^2 + K'). \quad (1)$$

Даже с учетом того, что параметры α и ω являются известными константами, данная функция имеет три независимые переменные, что усложняет дальнейшее исследование. Для решения данной проблемы было принято решение зафиксировать параметр K' .

Придадим параметрам α , ω и K' произвольные вещественные положительные значения. Тогда функция (1) станет функцией двух переменных, для которой можно построить поверхность. Также в этой же системе координат построим плоскость

$D_S = 0$, чтобы наглядно оценить, где дискриминант принимает положительные значения. Полученный результат представлен на рис. 2.

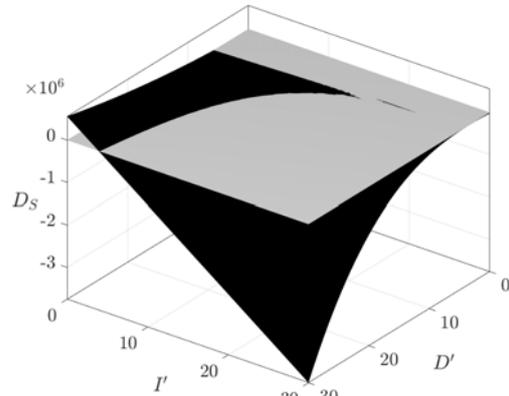


Рис. 2. Поверхность второго порядка функции дискриминанта и нулевая плоскость

Из построения видно, что область положительных значений дискриминанта при положительных значениях настроечных коэффициентов ограничена двумя кривыми. Рассмотрим проекцию на плоскость $D-I$.

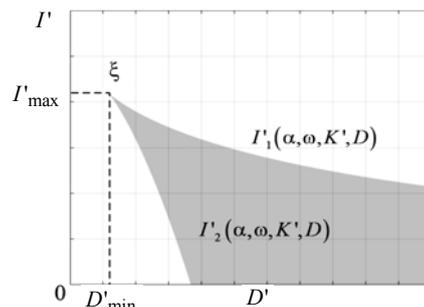


Рис. 3. Проекция области положительных значений дискриминанта на плоскость $D-I$

Необходимо определить аналитические выражения кривых, ограничивающих область положительных значений дискриминанта. Приравняем выражение (1) к нулю и выразим из него одну из составляющих, в данном случае – интегральную. В итоге получим решение в общем виде как две функции четырех переменных вида

$$I'_{1,2}(\alpha, \omega, K', D') = \left\{ \begin{aligned} & \frac{18\alpha K' + 9D'K'}{27} + \frac{2\sqrt{(\alpha^2 - 3\omega^2 + 4\alpha D' + D'^2 - 3K')^3}}{27} + \\ & + \frac{18\omega^2\alpha + 9\omega^2 D' - 12\alpha D'^2}{27} - \frac{15\alpha^2 D' + 2\alpha^3 - 2D'}{27}; \\ & \frac{18\alpha K' + 9D'K'}{27} - \frac{2\sqrt{(\alpha^2 - 3\omega^2 + 4\alpha D' + D'^2 - 3K')^3}}{27} + \\ & + \frac{18\omega^2\alpha + 9\omega^2 D' - 12\alpha D'^2}{27} - \frac{15\alpha^2 D' + 2\alpha^3 - 2D'}{27}. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Из рис. 3 видно, что область имеет некоторую точку, координатами которой являются максимально допустимое значение коэффициента интегрирования и минимально допустимое значение коэффициента дифференцирования при фиксированном коэффициенте пропорциональности для данного объекта. Обозначим данную точку как ξ .

Смысл данного значения ξ состоит в том, что для того, чтобы обеспечить вещественные значения для полюсов замкнутой системы колебательного звена второго порядка, интегральная составляющая не должна превышать некоторого значения I_{\max} , а дифференциальная составляющая должна быть больше некоторого значения D_{\min} .

Определим координаты точки ξ . Для этого приравняем первое и второе выражения в системе уравнений (2) и выразим из них дифференциальную составляющую. В результате получим пару функций вида

$$D'_\xi(\alpha, \omega, K') = \begin{cases} -2\alpha + \sqrt{3(\alpha^2 + \omega^2 + K')} \\ -2\alpha - \sqrt{3(\alpha^2 + \omega^2 + K')} \end{cases}. \quad (3)$$

В силу того, что значения α , ω и K' исключительно положительные, то условие сохранения значения дифференциальной составляющей больше нуля выполняется только для первого выражения в системе (3). Подставив полученное выражение в систему (2), получим выражение для определения максимально допустимого значения интегральной составляющей для заданного объекта управления

$$I'_\xi(\alpha, \omega, K') = \frac{\sqrt{3(\alpha^2 + \omega^2 + K')^3}}{9}. \quad (4)$$

Определив координаты точки области ξ допустимых значений настроечных коэффициентов можно сказать, что ее значение, помимо параметров объекта, определяется также выбранным коэффициентом пропорциональности регулятора. В силу того, что было решено выбирать значения коэффициентов положительными, то можно сделать выводы о влиянии выбранного коэффициента пропорциональности и, далее, наложить ограничения на его значения таким образом, чтобы диапазон допустимых настроечных параметров для выбранного объекта лежал в положительной полуплоскости.

Рассматривая выражение (4), можно сказать, что с ростом коэффициента пропорциональности, предельно допустимое значение коэффициента интегрирования также будет расти.

Однако, рассматривая аналитическое выражения для минимально допустимого значения коэффициента дифференцирования

$$D'_{\min} = -2\alpha + \sqrt{3(\alpha^2 + \omega^2 + K')}$$

можно заметить, что при различных значениях K' значение D'_{\min} может принимать как положитель-

ные, так и отрицательные значения. Определим значения K' такие, при которых минимально допустимое произведение коэффициента дифференцирования на коэффициент усиления объекта будет больше нуля, т.е. $D'_{\min} > 0$. Получим

$$K' > \frac{\alpha^2 - 3\omega^2}{3}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что значение коэффициента пропорциональности ограничено параметрами объекта управления, причем если $\alpha < \sqrt{3}\omega$, то нижнее ограничение принимает отрицательные значения, а значит, значение K' может быть любым положительным числом. В том случае, если $\alpha > \sqrt{3}\omega$, то выбранное значение коэффициента пропорциональности должно удовлетворять условию (5).

Таким образом, можно сказать, что для того, чтобы гарантировать вещественные полюса замкнутой системы с ПИД-регулятором и объектом второго порядка с комплексно-сопряженными полюсами $-\alpha \pm j\omega$, составляющие регулятора должны удовлетворять следующей системе ограничений:

$$\begin{cases} 0 < I' < I'_1(\alpha, \omega, K', D'); \\ I' > I'_2(\alpha, \omega, K', D') > 0; \\ I_{\max} = \sqrt{3(\alpha^2 + \omega^2 + K')^3} / 9; \\ D_{\min} = -2\alpha + \sqrt{3(\alpha^2 + \omega^2 + K')}; \\ K' > (\alpha^2 - 3\omega^2) / 3. \end{cases}$$

Стоит заметить, что каждому значению коэффициента интегрирования из диапазона $(0; I'_{\max})$ соответствует множество допустимых значений коэффициента дифференцирования. Необходимо найти аналитические выражения, которые позволят однозначно определить границы интервала допустимых значений параметра D' .

Найдем обратную функцию от функций (2), чтобы определить значения коэффициента D' при выбранном значении I' . В итоге левая и правая границы D'_L и D'_R множества допустимых значений параметра D' при заданном значении I' примут вид

$$\begin{cases} D'_L(A, B, C, E, F, I') = -\frac{1}{24} \frac{\sqrt[3]{24\sqrt{3A-B-C}}}{I'} - \\ \left[\frac{1}{24} \frac{E}{I'^3 \sqrt[3]{24\sqrt{3A-B-C}}} + \frac{1}{12} \frac{F}{I'} - \frac{1}{2} i\sqrt{3} \left(\frac{1}{12} \frac{\sqrt[3]{24\sqrt{3A-B-C}}}{I'} - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1}{12} \frac{E}{I'^3 \sqrt[3]{24\sqrt{3A-B-C}}} \right) \right]; \\ D'_R(A, B, C, E, F, I') = \frac{1}{12} \frac{\sqrt[3]{24\sqrt{3A-B-C}}}{I'} + \\ \left[\frac{1}{12} \frac{E}{I'^3 \sqrt[3]{24\sqrt{3A-B-C}}} + \frac{1}{12} \frac{F}{I'} \right]; \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned}
 A &= I' \left((-\alpha^6 - 3\alpha^4 \omega^2 - 3\alpha^2 \omega^4 - \omega^6 - 3K'\alpha^4 - 6K'\alpha^2 \omega^2 - \right. \\
 &\quad \left. - 3K'\omega^4 - 3K'^2 \alpha^2 - 3K'^2 \omega^2 - K^3 + 27I'^2)^3 \right)^{\frac{1}{2}}; \\
 B &= -\alpha^{12} - \omega^{12} - K'^6 + 5832I'^4 - 6\alpha^{10} \omega^2 - 15\alpha^8 \omega^4 - \\
 &\quad - 20\alpha^6 \omega^6 - 15\alpha^4 \omega^8 - 6\alpha^2 \omega^{10} - 6K'\alpha^{10} - 6K'\omega^{10} - \\
 &\quad - 15K'^2 \alpha^8 - 15K'^2 \omega^8 - 20K'^3 \alpha^6 - 20K'^3 \omega^6 + \\
 &\quad + 540I'^2 \alpha^6 - 15K'^4 \alpha^4 - 15K'^4 \omega^4 - 6K'^5 \alpha^2 - \\
 &\quad - 6K'^5 \omega^2 + 540I'^2 \omega^6 + 540I'^2 K'^3; \\
 C &= -30K'\alpha^8 \omega^2 - 60K'\alpha^6 \omega^4 - 60K'\alpha^4 \omega^6 - \\
 &\quad - 30K'\alpha^2 \omega^8 - 60K'^2 \alpha^6 \omega^2 - 90K'^2 \alpha^4 \omega^4 - \\
 &\quad - 60K'^2 \alpha^2 \omega^6 - 60K'^3 \alpha^4 \omega^2 - 60K'^3 \alpha^2 \omega^4 + \\
 &\quad + 1620I'^2 \alpha^4 \omega^2 + 1620I'^2 \alpha^2 \omega^4 - 30K'^4 \alpha^2 \omega^2 + \\
 &\quad + 1620I'^2 K'\alpha^4 + 1620I'^2 K'^2 \alpha^2 + 1620I'^2 K'\omega^4 + \\
 &\quad + 1620I'^2 K'^2 \omega^2 + 3240I'^2 K'\alpha^2 \omega^2; \\
 E &= 12 \cdot I' \left(4\alpha^5 + 8\alpha^3 \omega^2 + 4\alpha \omega^4 + 8K'\alpha^3 - 30I'\alpha^2 + \right. \\
 &\quad \left. + 18I'\omega^2 + 4K'^2 \alpha + 18I'K' \right) + \left(\alpha^4 + 2\alpha^2 \omega^2 + \omega^4 + \right. \\
 &\quad \left. + 2K'\alpha^2 + 2K'\omega^2 - 24I'\alpha + K'^2 \right)^2; \\
 F &= \alpha^4 + 2\alpha^2 \omega^2 + \omega^4 + 2K'\alpha^2 + 2K'\omega^2 - 24I'\alpha + K'^2.
 \end{aligned}$$

Таким образом, на основании полученных соотношений и ограничений сформулируем методику выбора коэффициентов регулятора:

1. Для известного объекта управления выбрать значение коэффициента пропорциональности регулятора K исходя из ограничения (5).
2. Выбрать значение параметра I' из полученного интервала допустимых значений коэффициента интегрирования $(0; I'_{\max})$.
3. Для выбранного значения параметра I' определить границы интервала допустимых значений коэффициента дифференцирования D'_L, D'_R с помощью (6) и далее выбрать значение, лежащее внутри полученных границ.

Пример

Зададимся объектом управления с передаточной функцией вида

$$W(s) = \frac{52}{s^2 + 4s + 14,24}.$$

Данный объект имеет пару комплексно-сопряженных полюсов $-\alpha \pm j\omega = -2 \pm 3,2j$, а его реакция на единичное ступенчатое воздействие представлена на рис. 4.

Переходная характеристика объекта управления имеет перерегулирование $\sigma = 14\%$ и время переходного процесса $t_p = 1,4$ с.

Произведем синтез регулятора для данного объекта согласно описанному подходу с использовани-

ем пакета прикладных программ Matlab. Основным требованием будет являться отсутствие перерегулирования. В качестве дополнительного условия выберем уменьшение времени переходного процесса.

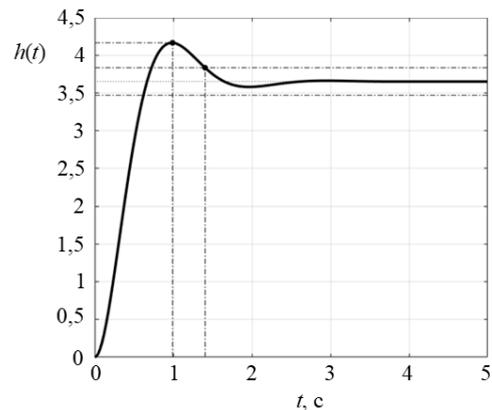


Рис. 4. Переходная характеристика объекта управления

Далее примем значение коэффициента пропорциональности регулятора $K = 13$. Тогда, с учетом коэффициента усиления объекта управления $K' = 676$. Для заданного объекта и выбранного коэффициента пропорциональности, согласно (4), $0 < I' < 3498$. Полученная область настроечных параметров, гарантирующих вещественные значения полюсов замкнутой системы, представлена на рис. 5.

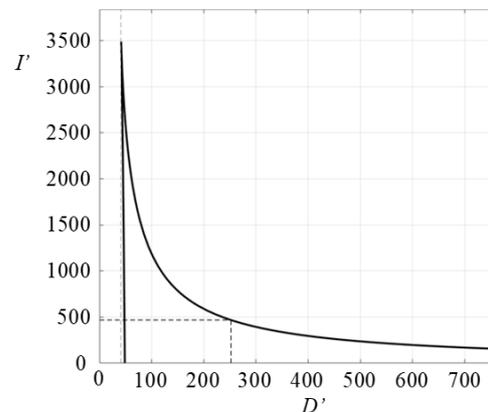


Рис. 5. Область параметров $I'(D')$, ограничивающих значения настроечных параметров

Выберем значение параметра I' из полученного интервала. Пусть $I' = 468$. Тогда, границы интервала допустимых значений параметра D' примут значения $D'_L = 47,85$ и $D'_R = 2518$. Примем значение коэффициента дифференцирования $D = 149,9$ и получим ПФ замкнутой системы

$$W_{CL}(s) = \frac{149s^2 + 676s + 468}{s^3 + 153,9s^2 + 690,2s + 468},$$

полюса которой примут значения

$$s_k = \begin{pmatrix} -0,8312 \\ -3,7725 \\ -149,2514 \end{pmatrix}, k = \overline{1,3}.$$

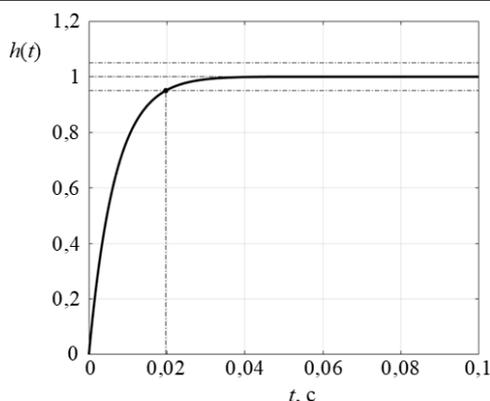


Рис. 6. Переходная характеристика замкнутой системы с синтезированным регулятором

Как видно из рис. 6, получившийся переходный процесс характеризуется нулевым перерегулированием, характер процесса монотонный, время переходного процесса снижено до $t_p = 0,02$ с.

Заключение

В результате работы были получены аналитические соотношения, которые ограничивают множество допустимых значений настроечных параметров регулятора, обеспечивающие исключительно вещественные решения характеристического уравнения замкнутой системы для объекта второго порядка. Полученные результаты дают представление о всем множестве допустимых значений настроечных параметров регулятора, которые удовлетворяют заявленным требованиям, а следовательно, о диапазонах подстройки значений параметров, а также позволяют масштабировать предложенный подход на системы с интервально заданными параметрами. Кроме того, определение именно области приемлемых значений позволяет также компенсировать неточность знания параметров объекта управления и меняющиеся условия функционирования. В работе [15] автором отмечено, что существенный недостаток численных расчетов не дает представления об аналитической связи полученного частного решения с поведением системы, что актуализирует полученные результаты.

По итогам работы было произведено моделирование в среде Matlab и полученный теоретический результат был подтвержден.

Литература

1. Федоров Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка: учеб.-практ. пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 928 с.
2. Ефимов С.В. Синтез ПИД-регулятора с учетом расположения нулей и полюсов системы автоматического регулирования / С.В. Ефимов, С.В. Замятин., С.А. Гайворонский // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2010. – Т. 317, № 5. – С. 102–107.
3. Замятин С.В. Размещение областей локализации доминирующих полюсов интервальной системы с обеспечением заданных показателей качества // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2006. – Т. 309, № 7. – С. 10–12.
4. Zemanian H. The properties of pole and zero locations for nondecreasing step responses // Trans. Amer. Inst. Elec.

Eng. Part I: Communication and Electronics. – 1960. – Vol. 79. – P. 421–426.

5. Jayasuriya S. On the synthesis of compensators for nonovershooting step response / S. Jayasuriya, J.W. Song // Proc. Amer. Contr. Conf. – Chicago: IEEE, 1992. – P. 683–684.

6. Hang C.C. The choice of controller zeros. // IEEE Control Systems Magazine. – 1989. – Vol. 9, No. 1. – P. 72–75.

7. Leon de la Barra B.A. Transient properties of type m continuous time scalar systems / B.A. Leon de la Barra, M.A. Fernandez // Automatica. – 1994. – Vol. 30, No. 9. – P. 1495–1496.

8. Kobayashi H. Output overshoot and pole-zero configuration // Proc. 12th IFAC World Congr. Automat. Contr. – 1993. – Vol. 2. – P. 529–532.

9. Herjolfsson G. Direct computation of optimal PID controllers / G. Herjolfsson, A.S. Hauksdottir // Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. – Maui: IEEE, 2003. – P. 1120–1225.

10. Синтез робастного регулятора методом двойной итеративной параллельной численной оптимизации / Б.В. Поллер, В.А. Жмудь, С.П. Новицкий, А.Н. Заворин // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 2. – С. 196–200.

11. Жмудь В.А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.

12. Schmidt D.K. Loop shaping and a zero-placement technique as applied to the benchmark problem // International journal of robust and nonlinear control. – 1995. – Vol. 1. – P. 33–51.

13. Prokopiev A.P. Synthesis PID Controller for Objects Second Order with Regard to the Location Poles / A.P. Prokopiev, V.I. Ivanchura, R.T. Emelyanov // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2016. – Vol. 1, No. 9. – P. 50–60.

14. Завьялов В.А. Расчёт параметров ПИД-регулятора / В.А. Завьялов, В.А. Величкин // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2014. – №5. – С. 190–192.

15. Ross Barmish B. New Tools for robustness of linear systems. – New York: Macmillan Publishing Company, 1994. – 394 p.

16. Фаддеев Д.К. Лекции по алгебре: учеб. пособие для вузов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 416 с.

Цавнин Алексей Владимирович

Аспирант отд. автоматизации и робототехники (ОАР) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-890-51-68
Эл. почта: avc14@tpu.ru

Ефимов Семен Викторович

Канд. техн. наук, доцент ОАР НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-62-59
Эл. почта: efimov@tpu.ru

Замятин Сергей Владимирович

Канд. техн. наук, доцент ОАР НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-56-60
Эл. почта: zamsv@tpu.ru

Tsavnin A.V., Efimov S.V., Zamyatin S.V.

PID-controller tuning approach guaranteeing non-overshooting step response

The PID-controller tuning approach for non-overshooting transient guaranteeing response is considered. The approach is based on tuning parameters of PID-controller that provide closed-loop system with second-order oscillatory plant having exclusively real poles. Analytic expressions that constrain range of acceptable tuning parameters are obtained. Modeling was conducted using Matlab.

Keywords: control system, PID-controller, zeros, poles, overshoot.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-77-82

References

1. Fedorov Y.N. *Spravochnik inzhenera po ASUTP: Prjektirovani I razrabotka* [ACS engineer handbook: design and development]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2008, 928 p. (in Russ.).

2. Efimov S.V., Zamyatin S.V., Gaivoronskiy S.A. [PID-controller design with respect to zeros and poles location]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 5, pp. 102–107 (in Russ.).

3. Zamyatin S.V. [Dominating poles regions of localization positioning providing required performance index]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 7, pp. 10–12 (in Russ.).

4. Zemanian H. The properties of pole and zero locations or nondecreasing step responses. *Trans. Amer. Inst. Elec. Eng. Part I: Communication and Electronics*, 1960, vol. 79, pp. 421–426.

5. Jayasuriya S, Song J.W. On the synthesis of compensators for nonovershooting step response. *Proc. Amer. Contr. Conf.*, 1992, vol. 1, pp. 683–684.

6. Hang C.C. The choice of controller zeros, *IEEE Control Systems Magazine*, 1989, vol. 9, no. 1, pp. 72–75.

7. Leon de la Barra B.A., Fernandez M. A. Transient properties of type m continuous time scalar systems. *Automatica*, 1994, vol. 30, no. 9, pp. 1495–1496.

8. Kobayashi H. Output overshoot and pole-zero configuration. *Proc. 12th IFAC World Congr. Automat. Contr.*, 1993, vol. 2, pp. 529–532.

9. Herjolfsson G., Hauksdottir A. S. Direct computation of optimal PID controllers. *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2003, vol. 1, pp. 1120–1225.

10. Zavorin A., Novitskiy S., Zhmud V, Yadrishnikov O., Poller B. The design of the robust regulator by means of the double iterative numerical optimization. *Nauchny vestnik NGTU*, 2012, no. 2, pp. 196–200 (in Russ.).

11. Zhmud V.A. *Modelirovanie, issledovanie i optimizatsia zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravleniya. Monografiya* [Closed-loop control systems modeling, research and optimization. Monograph]. Novosibirsk. NGTU Publ., 2012. 335 p. (in Russ.).

12. Schmidt D.K. Loop shaping and a zero-placement technique as applied to the benchmark problem. *International journal of robust and nonlinear control*, 1995, vol. 1, pp. 33–51.

13. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelyanov R.T. Synthesis PID Controller for Objects Second Order with Regard to the Location Poles. *Journal of Siberian Federal University: Engineering & Technologies*, 2016, vol. 1, no. 9, pp. 50–60.

14. Zavialov V.A., Velichkin V.A. [PID-controller parameters calculation]. *Scientific and technical Volga region bulletin*, 2014, no. 5, pp. 190–192 (in Russ.).

15. Ross Barmish B. *New Tools for robustness of linear systems*, Macmillan Publishing Company, New York, 1994, 394 p.

16. Faddeev D.K. *Lektsii po algebre: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Algebra lectures: Study guide for universities]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 416 p. (in Russ.).

Alexey V. Tsavnin

PhD Student, Division for Automation and Robotics (DAR), National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU) 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-890-51-68
Email: avc14@tpu.ru

Semen V. Efimov

Candidate of Engineering, Associate Professor DAR NR TPU 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-62-59
Email: efimov@tpu.ru

Sergey V. Zamyatin

Candidate of Engineering, Associate Professor DAR NR TPU 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-56-60
Email: zamsv@tpu.ru

УДК 004.415.2

А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов

Объектно-ориентированный анализ алгоритма управления и проектирование архитектуры программного обеспечения для климатической экранированной ТЕМ-камеры

Представлен процесс проектирования программного обеспечения (ПО) климатической экранированной ТЕМ-камеры в соответствии с объектно-ориентированным подходом. Спроектирована архитектура ПО камеры, состоящая из модулей контроля, управления и диагностики. Разработана концептуальная модель данных ТЕМ-камеры посредством Unified Model Language. Представлены UML-диаграммы прецедентов, деятельности, классов, компонентов.

Ключевые слова: моделирование, UML, архитектура ПО, программная документация.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-83-89

Одним из инструментов разработки и описания модели программного обеспечения (ПО) является унифицированный язык моделирования UML [1, 2]. Расширяемая концепция данного языка позволяет описать модели не только в области разработки ПО, но и в области системного анализа [3], моделирования технических и экономических систем, а также их динамики (стандарт-диалект System Model Language (SysML [4])). Разрабатываемая климатическая экранированная ТЕМ-камера (КЭК) [5–10] является новым и сложным устройством, сочетающим в себе различные семейства (архитектура) вычислительных модулей: синхронизированную группу микроконтроллеров (МК) ATmega 2560 [11], микропроцессор Atmel SAM5D44 [12], высокопроизводительный МК STM32F746 [13], графический сенсорный дисплей, распределенную систему сбора и обработки данных [14] и систему диагностики КЭК [15]. Таким образом, при проектировании модели и архитектуры ПО КЭК следует учитывать множество факторов, включая аппаратные и программные ограничения.

Цель работы – выполнить анализ и разработать архитектуру ПО посредством унифицированного языка моделирования UML для КЭК.

Задачей является выявить детали работы каждого объекта в устройстве КЭК и выполнить их функциональную декомпозицию, при помощи которой возможно выделить внутренние компоненты, ограничения и требования к разрабатываемому ПО КЭК.

Диаграмма прецедентов

Выполнен анализ в области электромагнитной совместимости (ЭМС) на начальном этапе проектирования архитектуры ПО, который позволяет классифицировать и формализовать сведения обо всех аспектах, определяющих свойства разрабатываемой КЭК, а также способствует выявлению ошибок на раннем этапе проектирования ПО. Разработка архитектуры ПО начата с концептуальной модели, главной задачей которой являлось определить функциональные требования, отразить описание процесса функционирования и способы взаимодействия оператора с КЭК.

КЭК разрабатывается для проведения исследований и испытаний малогабаритных радиоэлектронных средств на совместные климатические и электромагнитные воздействия. Результатом исследования и испытания будут являться данные об объекте, подвергнутом совместным климатическому и электромагнитному воздействиям. Диаграмма прецедентов КЭК (рис. 1) содержит *актера (оператора)* и 6 прецедентов: *ввод данных, анализ объекта исследования, программа исследования, совместные воздействия, климатическое воздействие, электромагнитное воздействие, результат исследования.*

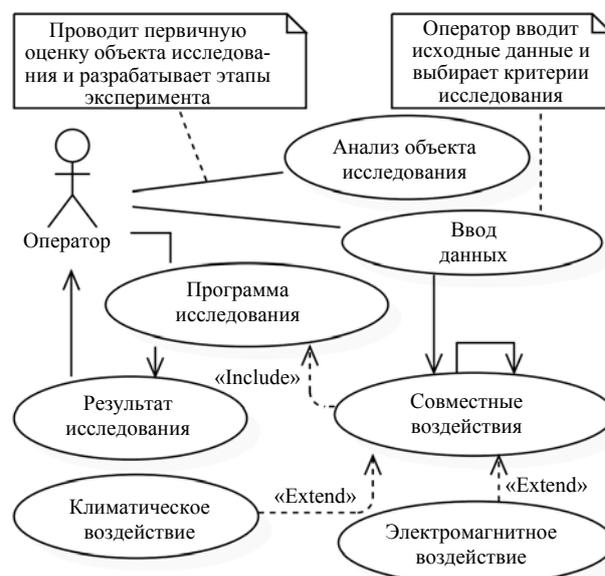


Рис. 1. UML-диаграмма прецедентов КЭК

Оператор проводит анализ исследуемого объекта, в процессе которого определяет критерии (время воздействия, диапазон частот и уровни амплитуд напряженности электрического поля, а также диапазон температур и влажности) для проведения исследования и испытания на совместные климатические и электромагнитные воздействия. Прецеденты *климатическое воздействие* и *электромагнитное воздействие* являются расширениями прецедента *совместные воздействия*, который передаёт данные

прецеденту *результат исследования*. Из переданных данных прецедентом *результат исследования* формируется отчет для оператора.

Диаграмма деятельности

Взаимодействие процессов, скрывающихся в объектах работы КЭК, а также изменение её внутреннего состояния в момент функционирования при различных сценариях выполнены при помощи обобщенной диаграммы деятельности (рис. 2). В ней отражены ключевые моменты функционирования КЭК, отсутствие которых может привести к неработоспособности. *Включение КЭК* отражает действие оператора КЭК, которое инициирует процесс *запуск и инициализация системы КЭК*. На этом этапе запускаются алгоритмы проверки, калибровки и настройки систем, обеспечивающих работу КЭК. Процесс *самодиагностика систем КЭК* выполняет набор функциональных тестов (термоэлектрических элементов Пельтье (ЭП), датчиков тока, температуры (ДТ) и т.д.) перед началом работы КЭК. В случае обнаружения аппаратных ошибок или программного сбоя в процессе теста результат поступает в блок *обработка ошибок*, для регистрации ошибки и вывода соответствующего сообщения оператору. При положительном результате управление переходит в блок *ввод данных*, в котором выставляются диапазоны влажности, температуры, времени, напряженности электрического поля и режим работы КЭК. Далее управление передается в *процесс воздействия в КЭК*. На этом этапе выполняется основная задача КЭК, происходят климатическое и/или электромагнитное воздействия на объект исследования. Все данные с датчиков и служб записываются в соответствующий файл для дальнейшей обработки. По истечении заданного времени воздействия, а также если не возникло ситуаций, повлекших преждевременный вызов процесса *остановка процесса воздействия*, выполняется процесс *завершение воздействия*. Основываясь на обработанных результатах, получается процесс *отчет*, в котором формируется итоговый результат, содержащий параметры климатического и/или электромагнитного воздействия на исследуемый объект в КЭК.

Создана расширенная диаграмма деятельности КЭК (рис. 3), которая состоит из связей трех компонентов: *Control panel*, *Master* и *Climatic control*, расположенных на разных вычислительных устройствах, процессы которых взаимодействуют между собой, выполняя определенную часть обработки информации при работе КЭК. Блоки *Master* и *Climatic control* контролируют процесс синхронизации работы группы МК, выполняющих многофазное управление электропитанием ЭП посредством сигналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Блок *Climatic control*, у которого входными данными являются команды управления от блока *Master*, предназначен для функционирования климатической подсистемы КЭК. Блок *Master* контролирует процессы опроса датчиков тока и температуры. Осно-

вываясь на данных из этих трёх блоков, ПИД-регулятор выполняет расчет управляющего сигнала для ЭП. Обратная связь в виде *показания температуры, влажности и потребляемого тока*, которые в дальнейшем необходимы для обработки и отображения в ПО оператора КЭК, поступают в компонент *сбор и обработка данных*, расположенный в блоке *Master*. При помощи блока *Control panel* происходит управление КЭК, используя сенсорный индикатор с графическим интерфейсом. Блок представлен в виде инструментов ввода/вывода данных и служебной информации. Оценка вычислительной сложности, используя известные аналитические методы, позволит оптимизировать и распределить нагрузку между вычислительными узлами аппаратного уровня, что облегчит разработку архитектуры ПО КЭК.

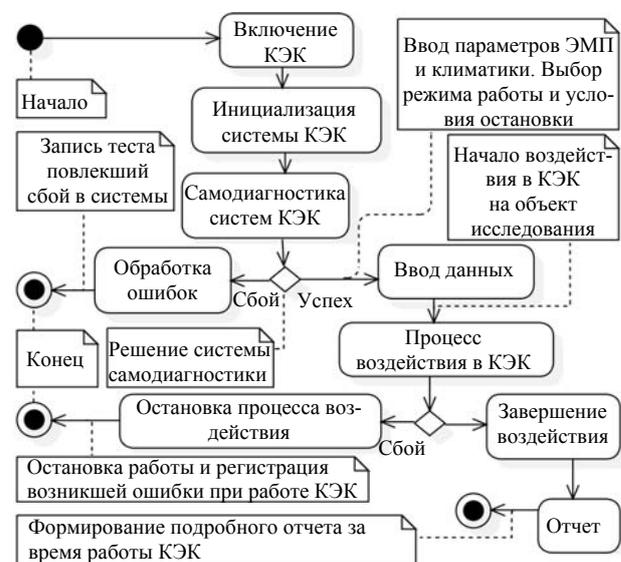


Рис. 2. Обобщенная диаграмма деятельности КЭК

Таким образом, в расширенной диаграмме деятельности возможно внесение модификаций в проектируемую архитектуру ПО КЭК, что позволит оценить вычислительную нагрузку системы для дальнейшего совершенствования аппаратной части (архитектура МК, количество портов ввода/вывода, периферия) КЭК.

Диаграмма классов

В процессе проектирования ПО КЭК построена детализированная диаграмма классов (рис. 4), отражающая периферию, основные методы и интерфейсы взаимодействия вычислительных модулей (МК и СМК). Основными классами в диаграмме являются: *Hardware*, *Slave microcontroller*, *Master microcontroller*, *Control panel*, *Control board*, *Interface*. Данные классы отвечают за выполнение определенных задач и могут обмениваться через интерфейс данными с другими классами посредством определенных функций.

Класс *Hardware* описывает аппаратную часть вычислительных модулей с периферией и является расширением для классов *Control board*, *Master microcontroller* и *Slave microcontroller*, которые насле-

дуют его атрибуты и методы с объявленным модификатором доступа *Public*. В атрибутах класса *Hardware* отражена информация о системной частоте вычислительного модуля (*SystemClock*) и количестве: программируемых выводов общего назначения (*GPIO*), выводов, поддерживающих режим работы ШИМ (*PWM*), таймеров (*Timers*), аналого-цифрового преобразователя (*ADC*) и цифроаналогового преобразователя (*DAC*), интерфейсов обмена данными (*Interface*). Методы, реализованные в классе *Hardware*, выполняют инициализацию аппаратных компонентов, перечисленных ранее в атрибутах. Также реали-

зованы методы *Get u Set*, посредством которых выполняется управление и чтение состояния атрибутов класса *Hardware*.

Класс *Interface* связывается отношением *композиция* с классами *Slave microcontroller*, *Master microcontroller* и *Control panel*. Таким образом, атрибуты и методы класса *Interface* доступны только во время работы связанных с ним классов и не могут существовать после удаления объекта, с которым он состоит в отношении композиции. Атрибуты класса *Interface* отражают общую информацию об интерфейсах, имеющихся в МК и СнК в составе КЭК.

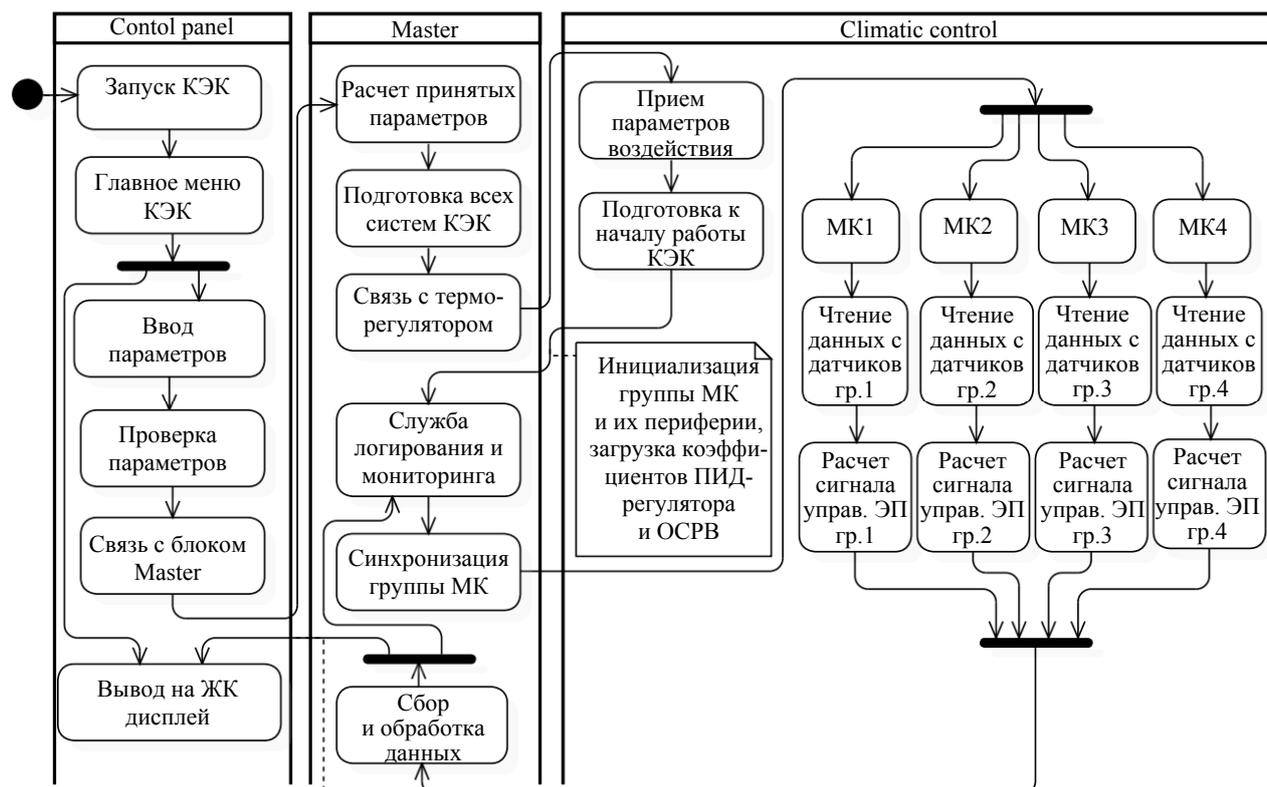


Рис. 3. Расширенная диаграмма деятельности с распределением процессов по компонентам КЭК

Обобщающим классом является *Control board*, содержащий: *Master microcontroller*, атрибуты всех МК и терморегулятора. Классы *Master microcontroller* и *Slave microcontroller* (рис. 4) связаны отношением композиции с классом *Control board*. Данный класс обладает атрибутами *Master ID*, *status* и *error flag*. Атрибут *Master ID* содержит идентификационный номер *мастера*, который будет использоваться всеми вычислительными устройствами КЭК в качестве адреса для подписи сообщений, предназначенных для класса *Master microcontroller*. Атрибут *status* служит для отображения текущего состояния устройства управления, например, в случае возникновения сбоя в этот атрибут будет помещен код ошибки *error flag*. Таким образом, система диагностики КЭК, определив изменение флага *error flag*, выполнит аварийное завершение работы КЭК и выдаст сообщение об ошибке, соответствующее атри-

буту *status*. Метод *command* предназначен для выполнения команд, принятых от класса *Master microcontroller*.

Класс *Control panel* состоит из атрибутов и методов пульта управления КЭК, образуя человеко-машинный интерфейс. В качестве интерфейса ввода/вывода используется ЖК дисплей с сенсорной панелью (*touchscreen*), на котором отображается графический интерфейс ПО. Атрибуты *Display*, *High*, *Width*, *Button*, *Widget* предназначены для графического ПО, в них содержится ширина и высота дисплея, функциональное назначение кнопок и виджеты, входящие в набор базовых компонентов Qt Creator, который применяется при проектировании графического интерфейса ПО *Control panel*. Метод *View menu* выводит главное меню на экран пульта управления КЭК. В нем реализованы элементы навигации по вкладкам и пунктам ПО пульта управления КЭК.

В диаграмме классов (см. рис. 4) для получения различной информации в процессе работы КЭК, реализованы методы, название которых начинается с префикса *Get**. Они запрашивают информацию у экземпляра класса и в качестве результата возвращают информацию (значения температуры, влажности, режим работы КЭК, параметры ШИМ-сигнала и др.) в определенном формате. Для изменения параметров КЭК реализованы методы, название которых начинается с префикса *Set**. Например, для установки диапазонов значений температуры и влаж-

ности воздуха в КЭК следует использовать методы *SetTemp()* и *SetHumidity()*. Все операции класса *Control panel*, влияющие на параметры воздействия в КЭК, передаются в экземпляр класса *Master microcontroller*, в котором изначально происходит регистрация принятых данных, а также их обработка и проверка. После того как прошла их обработка и проверка, методы класса *Master microcontroller* передают данные в терморегулятор, расположенный в классе *Control board*.

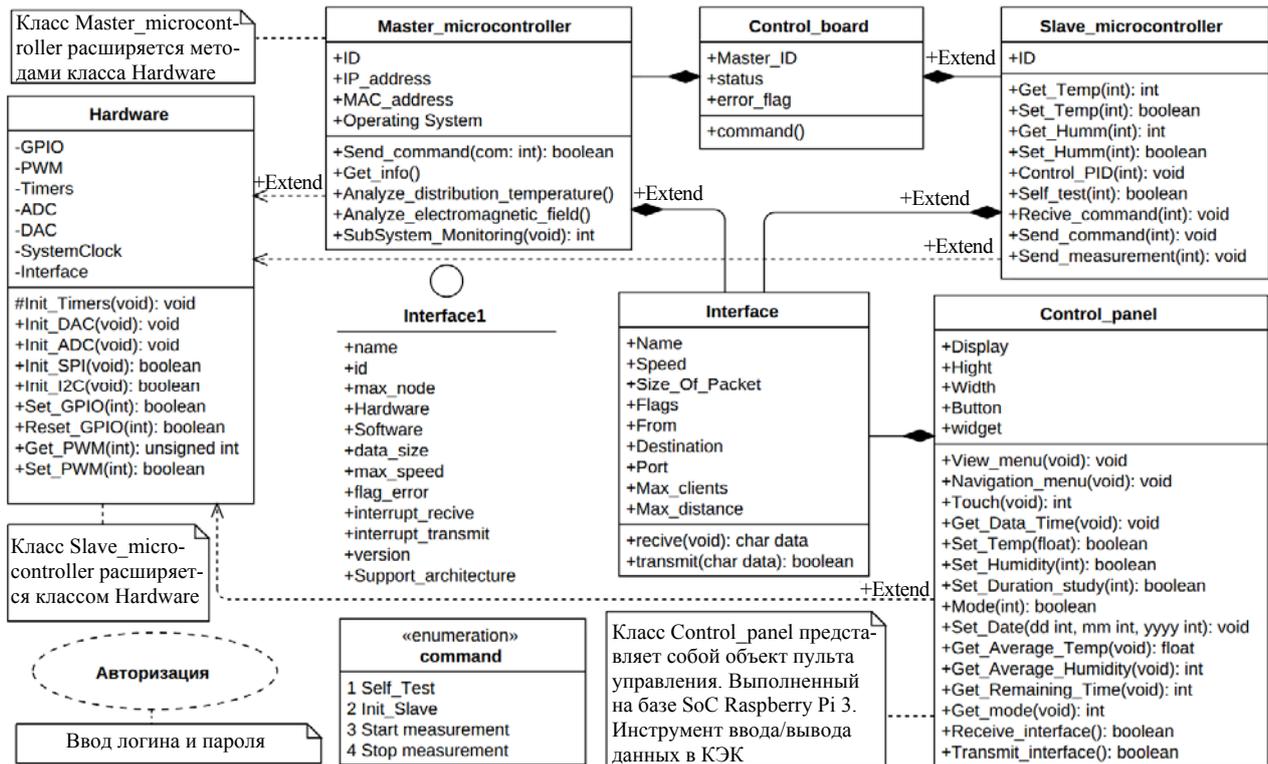


Рис. 4. Диаграмма классов в нотации UML

В процессе проектирования ПО КЭК количество диаграмм классов может достигать значительного количества, поскольку на рис. 4 представлена только основная часть ПО КЭК, в которой не учитывалось специализированное ПО оператора КЭК, а также ПО автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора для работы с КЭК на персональном компьютере.

Диаграмма компонентов

Основываясь на диаграммах прецедентов и классов, разработана диаграмма компонентов КЭК (рис. 5). Диаграмма описывает особенности физического представления системы, позволяет максимально точно определить архитектуру разрабатываемой системы, установить зависимости между программными компонентами: исходный, бинарный и исполняемый коды, внешние библиотеки, стороннее ПО, аппаратные (I²C, USART, Ethernet) и программные (API, сокет, протоколы) интерфейсы передачи данных.

Диаграмма компонентов позволяет оценить масштабы проектируемой системы, выделить ос-

новные компоненты и способы их объединения, в частности, согласовать интерфейсы между пакетами и компонентами и их зависимости. Основными узлами (*node*) диаграммы компонентов являются *персональный компьютер*, *пульт управления*, *Master* и *терморегулятор*. К узлу *персональный компьютер* относится компонент *АРМ оператора*, который включает такие элементы, как среда разработки *Qt framework* и *внешние библиотеки*, используемые в процессе разработки ПО.

В узел *пульт управления* входят компоненты *ЖК-дисплей*, *сенсорная панель*, операционная система реального времени (ОСРВ) *Free RTOS*, что в совокупности образует законченное устройство пульта управления КЭК. Аналогичным образом каждый узел представляет собой законченную часть КЭК. Из диаграммы компонентов видно, что в состав компонента *АРМ оператора* входят компоненты *внешние библиотеки* и *Qt framework*, что объясняет их отсутствие в представленных ранее UML-диаграммах.

Компонент *OC Linux Yocto* представляет собой встраиваемую операционную систему (ОС), функционирующую в СнК. В состав ОС входят компоненты *Qt framework* для разработки графического приложения пульта управления КЭК. С компонентами *ЖК-дисплей* и *сенсорная панель* связь осуществляется по соответствующим интерфейсам *ITouch* и *ILCD* (см. рис. 5).

Компонент *ОСРВ группы МК* представляет собой группу МК в составе узла *терморегулятор*. Управление МК осуществляется посредством *ОСРВ*

mRTOS, который обладает интерфейсами I^2C и *PWM* для работы с датчиками тока, температуры и влажности воздуха. Управление климатической подсистемой в КЭК осуществляется компонентами *ПИД-регулятора* и *синхронизация группы МК*. В узел *терморегулятор* входит компонент *вспомогательная система*, в задачу которого входит контроль температуры (*IWire*) отсека блоков питания КЭК, управление охлаждением (*ICooler*) и управление 4 двигателями, выполняющими функцию открытия/закрытия двери КЭК (*IPWM*).

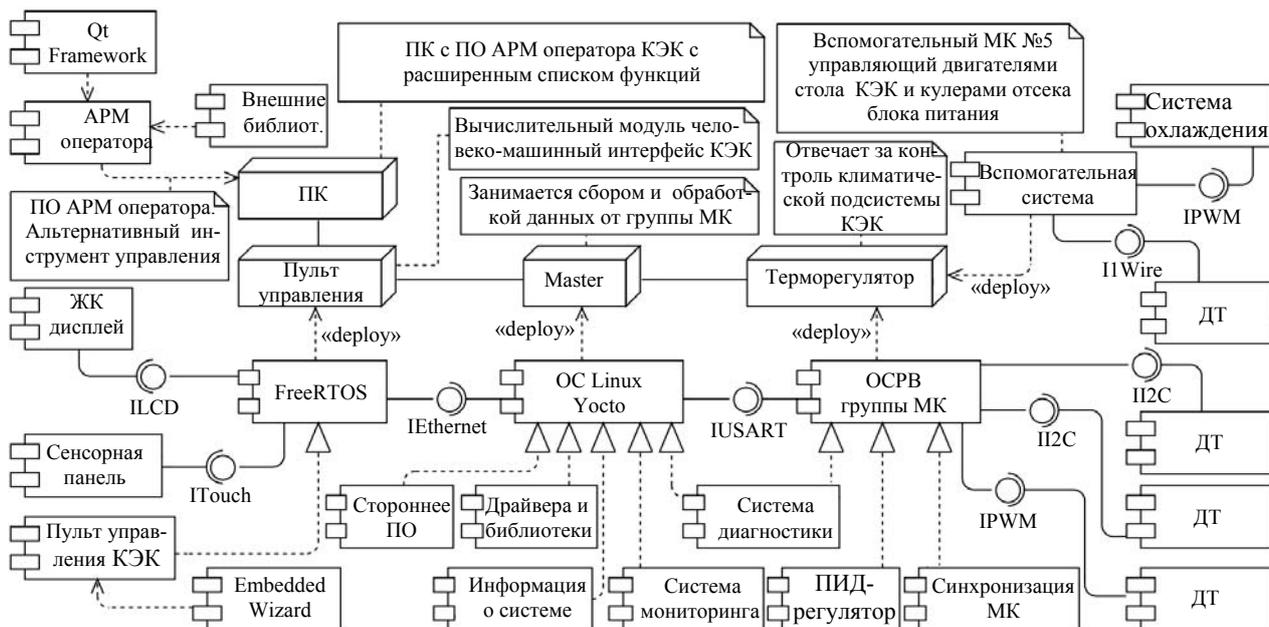


Рис. 5. UML-диаграмма компонентов КЭК

Компонент *система диагностики* выполняет проверку корректности работы элементов КЭК в фоновом режиме работы, и при обнаружении отклонения контролируемых параметров от установленной нормы система проведет анализ для классификации степени угрозы. Если отклонение незначительно и не приведет к критическому сбою работы КЭК, то системой будет исправлена ошибка. Если система распознает критическую ошибку, то она произведет запись о возникшей ошибке в файл логирования и автоматически остановит работу КЭК. Данный компонент относится к узлам *OC Linux Yocto* и *ОСРВ группы МК*, поскольку эти узлы являются наиболее критичными в работе КЭК.

Таким образом, диаграмма компонентов дает подробное представление устройства и функционирования КЭК, уточняя интерфейсы связи и зависимости компонентов. С целью облегчения процесса разработки и приведения программного кода к единому стандарту используют паттерны проектирования, которые представлены в виде шаблонного решения известной задачи. Это позволяет избежать

большинства распространенных ошибок в процессе разработки ПО.

Заключение

Проведена функциональная декомпозиция и разработана архитектура ПО КЭК согласно правилам унифицированного языка моделирования UML. Спроектированная архитектура ПО КЭК содержит UML-диаграммы прецедентов, деятельности, классов и компонентов. Каждый тип диаграммы позволяет представить систему КЭК с позиции инженера, архитектора ПО, разработчика, руководителя, менеджера проекта. Полученные диаграммы могут дополняться и изменяться в процессе разработки КЭК. Придерживаясь изложенных рекомендаций, удастся избежать наиболее распространенных ошибок (логические ошибки, ошибки совместимости, ошибки интеграции и представления данных в КЭК) в процессе проектирования модели, алгоритмов и разработки ПО КЭК. Подробное описание деталей UML-диаграмм будет использовано при составлении аппаратной и программной документации КЭК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

Литература

1. Rumbaugh J. UML. The unified modelling language reference manual / J. Rumbaugh, I. Jacobson, G. Booch. – 2nd Ed. – Boston, Pearson Higher Education, 2006. – 736 p.
2. Рамбо Дж. UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка / Дж. Рамбо, М. Блаха. – СПб.: Питер, 2007. – 545 с.
3. Фаулер М. UML, основы: краткое руководство по стандартному языку объектного моделирования. – СПб.: Питер, Символ-Плюс, 2018. – 312 с.
4. Delligatti L. SysML distilled a brief guide to the systems modeling language. – Addison-Wesley Professional, 2014. – 304 p.
5. Пат. 2558706 РФ. Климатическая экранированная камера / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2014103639. Заявл.: 3.02.2014; опубл.: 08.07.15.
6. Пат. 2674878 РФ. Устройство синхронизации микроконтроллеров / А.А. Собко, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, М.П. Сухоруков. – Заявка № 2017117125. Заявл.: 16.05.2017; опубл.: 13.12.18.
7. Комнатнов М.Е. Камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний электронных компонентов / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – № 3(23). – С. 84–91.
8. Комнатнов М.Е. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 4. – С. 39–45.
9. Komnatnov M.E. Environmental Shielded TEM Chamber for Biomedical Testing / M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // Proc. of IEEE International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-Bio 2014). – 2014. – P. 64–68.
10. Osintsev A.V. Method for synchronizing a group of heterogeneous microcontrollers with time control of synchronous work / A.V. Osintsev, A.A. Sobko, M.E. Komnatnov // Proc. of IEEE 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 2017. – P. 305–308.
11. Техническая документация на Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V // Microchip Technology – 2014. – URL: http://www.atmel.com/images/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf (дата обращения: 05.06.2019).
12. Техническая документация на SAMA5D4 Series SAMA5D41 /42/43/44 // Microchip Technology – 2017. – URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/60001525a.pdf> (дата обращения: 01.06.2019).
13. Техническая документация на STM32F746xx // STMicroelectronics. – 2016. – URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/DM00166116.pdf> (дата обращения: 01.06.2019).
14. Осинцев А.В. Система сбора и обработки данных климатической экранированной TEM-камеры / А.В. Осинцев, А.А. Собко, М.Е. Комнатнов // Современные проблемы радиоэлектроники. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – С. 315–319.
15. Osintsev A.V. Diagnostic Service by Means of a Real-Time Operating System for Environmental Shielded TEM-chamber / A.V. Osintsev, A.A. Sobko, M.E. Komnatnov, M.P. Sukhorukov, Y.A. Shinyakov // Proc. of IEEE 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 2017. – P. 301–304.

Осинцев Артем Викторович

Аспирант каф. автоматизации и обработки информации (АОИ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-755-01-23
Эл. почта: kubenet@gmail.com

Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент каф. ТУ ТУСУРА Ленина пр-т, д. 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.

Object-oriented analysis and design of the algorithm and architecture control software of environmental shielded TEM-chamber

The article presents the process of designing software environment shielded TEM-chamber in accordance with the object-oriented approach. The software architecture of the TEM-chamber, consisting of monitoring, control and diagnostics modules, was designed. A conceptual data model for the TEM-chamber was developed using the Unified Model Language. UML diagrams are presented: use cases, activities, classes, components.

Keywords: UML, software architecture, software documentation.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-83-89

References

1. Rumbaugh J., Jacobson I., Booch G. UML. The unified modelling language reference manual. 2nd Edition. Boston, Pearson Education, 2006, 736 p.
2. Rambo J., Blaha M. UML 2.0. Ob"ektno-orientirovannoe modelirovanie i razrabotka [Object-oriented modeling and development]. Saint Petersburg, Piter, 2007, 545 p. (in Russ.).
3. Fowler M. UML. Osnovy. Kratkoe rukovodstvo po standartnomu yazyku ob"ektnogo modelirovaniya [UML, basics: a brief guide to the standard object modeling language]. Saint Petersburg, Symbol Plus, 2018, 312 p. (in Russ.).
4. Delligatti L. SysML distilled a brief guide to the systems modeling language. Boston, Addison-Wesley Professional, 2013, 304 p.
5. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Klimaticheskaya ekranirovannaya kamera [Climatic screened camera]. Patent RF, no. 2558706, 2015 (in Russ.).
6. Sobko A.A., Osintsev A.V., Komnatnov M.E., Gazizov T.R., Sukhorukov M.P. Kamera dlya sovmestnykh klimaticheskikh i elektromagnitnykh ispytaniy elektronnykh komponentov [Microcontroller sync device]. Patent RF, no. 2674878, 2018 (in Russ.).
7. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. O sovmestnykh klimaticheskikh i elektromagnitnykh ispytaniyakh [Chamber for joint environmental and electromagnetic testing of electronic components]. Radio communication equipment, 2014, vol 23, no. 3, pp. 84–91 (in Russ.).
8. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. About joint climatic and electromagnetic tests. Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, no. 4, 2014, pp. 39–45 (in Russ.).
9. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Environmental Shielded TEM Chamber for Biomedical Testing. Proc. IEEE

International Microwave Workshop (IMWS-Bio 2014), 2014, pp. 64–68.

10. Osintsev A.V., Sobko A.A., Komnatnov M.E. Method for synchronizing a group of heterogeneous microcontrollers with time control of synchronous work. *Problems of Complex Systems Optimization*. Novosibirsk, 2017, pp. 305–308.

11. Microcontroller Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V. Available at: http://www.atmel.com/images/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf (Accessed: June 05, 2019).

12. Microcontroller SAMA5D4 Series SAMA5D41/42/43/44. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/60001525a.pdf> (Accessed: June 06, 2019).

13. Microcontroller STM32F746xx. Available at: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/DM00166116.pdf> (Accessed: June 06, 2019).

14. Osintsev A.V., Sobko A.A., Komnatnov M.E. Sistema sbora i obrabotki dannyh klimaticheskoy ekranirovannoj TEM-kamery [System for collecting and processing data of a climatic screened TEM camera]. *Modern problems of radio electronics*. Krasnoyarsk, Sib. feder. University Press, 2016, pp. 315–319 (in Russ.).

15. Osintsev A.V., Sobko A.A., Komnatnov M.E., Sukhorukov M.P., Shinyakov Y.A. Diagnostic Service by Means

of a Real-Time Operating System for Environmental Shielded TEM-chamber. *Proc. of IEEE 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences*. Novosibirsk, 2017. pp. 301–304.

Artem V. Osintsev

Postgraduate student,
Department of Data Processing Automation,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-755-01-23
Email: kubenet@gmail.com

Maxim E. Komnatnov

Candidate of Engineering, Assistant 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 519.688:622.276

В.Л. Сергеев, Донг Ван Хоанг, Д.Э. Хагай

Модели и алгоритмы адаптивного метода диагностики фильтрационных потоков в процессе испытаний горизонтальных скважин

Рассматривается метод выделения фильтрационных потоков в процессе проведения испытаний скважин с горизонтальным окончанием по кривой восстановления давления с использованием модели логарифмической производной забойного давления и алгоритмов адаптивной идентификации. Приводятся результаты сравнительного анализа графоаналитического, аналитического и предложенного адаптивного метода диагностики потоков по промысловым данным испытаний двух горизонтальных скважин.

Ключевые слова: фильтрационные потоки, диагностика, испытания скважин, кривая восстановления давления, адаптация, идентификация, интегрированные системы моделей, дополнительная информация.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-90-95

При решении задачи идентификации и интерпретации результатов гидродинамических исследований горизонтальных скважин (ГДИС) по кривой восстановления забойного давления возникает проблема выделения фильтрационных потоков [1–3]. Наиболее распространенными традиционными способами выделения потоков являются аналитические и графоаналитические методы [1–4].

В основе аналитического метода используются приведенные в табл. 1 формулы для определения моментов времени начала фильтрационных потоков. Недостатком аналитических методов выделения потоков является присутствие в формулах неизвестных значений горизонтальной k_y , вертикальной k_z проницаемости призабойной зоны скважин и эффективной (работающей) длины горизонтального ствола скважины L , для определения которых и проводятся гидродинамические исследования скважин [3–4] (см. табл. 1).

Таблица 1

Традиционные методы диагностики фильтрационных потоков горизонтальных скважин

Фильтрационные потоки	Критерий графоаналитического метода [2, 5]	Критерий аналитического метода [3]
Ранний радиальный	$\frac{dP_3}{d \ln t} \approx \text{const}$	$t_{\text{ррп}} = \frac{160,9L^2 \phi \mu c_t}{k_y}$
Линейный	Наклон прямой равен $0,5 \pm \Delta$, $\Delta = 0,1 \div 0,15$	$t_{\text{лп}} = \frac{2316,6 \phi \mu c_t D_z^2}{k_z}$
Поздний радиальный	$\frac{dP_3}{d \ln t} \approx \text{const}$	$t_{\text{прп}} = \frac{1904,8L^2 \phi \mu c_t}{k_y}$

Графоаналитические методы выделения потоков, реализованные в ряде отечественных и зарубежных программ интерпретации ГДИС, основаны на анализе логарифмической производной забойного давления (ЛПЗД) [1, 2]

$$y(t) = \lg\left(\frac{d\Delta P_3(t)}{d \ln t}\right) = \alpha_1 + \alpha_2 \lg t, \quad (1)$$

где $\Delta P_3(t) = P_3(t) - P_3(t_0)$; $P_3(t)$ – забойное давление после остановки скважины; $P_3(t_0)$ – забойное давление в момент остановки скважины t_0 .

На рис. 1 для примера приведен диагностический график выделения потоков при использовании графоаналитического метода, где линиями 1, 2 изображены забойные давления $\Delta P_3(t)$ и ЛПЗД $y(t)$ в двойных логарифмических координатах ($\Delta P_3(t), y(t)$ – по оси Y ; $\lg t$ – по оси X). Логарифмическая производная забойного давления и параметр α_2 модели (1) являются диагностическими признаками фильтрационных потоков. Так, например, на участке линейного потока график функции $y(t)$ имеет вид прямой линии с наклоном, равным $\alpha_2 = 0,5 \pm \Delta$ (см. рис. 1 и табл. 1) [2, 5].

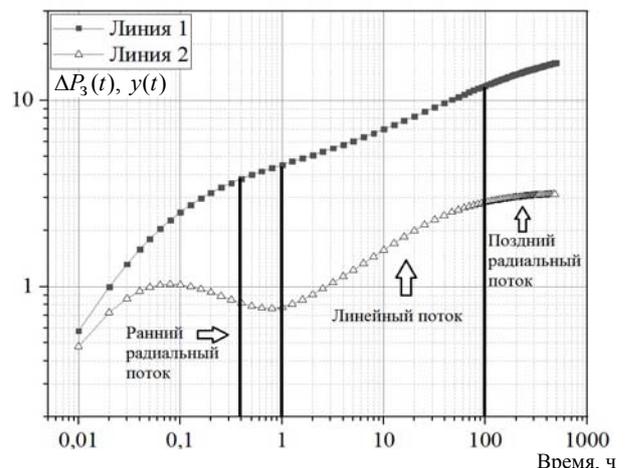


Рис. 1. Диагностический график горизонтальной скважины в двойных логарифмических координатах

В табл. 1 приведены диагностические критерии выделения потоков графоаналитического метода и формулы начала потоков аналитического метода, где D_z – наибольшее расстояние между скважиной и границей в направлении оси Z ; k_y, k_z – проницаемости призабойной зоны скважины в направлении оси

У и оси Z; ϕ – пористость; μ – динамическая вязкость нефти; c_t – сжимаемость системы пласта; L – эффективная длина горизонтальной скважины.

Отметим, что использование традиционных аналитического и графоаналитического методов выделения потоков в процессе проведения испытаний скважин в промышленных условиях вызывает значительные трудности, поскольку требует достоверной информации о состоянии призабойной зоны скважин (аналитические методы) либо детального анализа производных забойного давления с привлечением квалифицированных интерпретаторов (графоаналитические методы).

В настоящее время в нефтегазовых компаниях широко используются стационарные информационно-измерительные телеметрические системы длительного мониторинга параметров разработки, что дает возможность применять адаптивные технологии идентификации и диагностики нефтяных и газовых пластов в процессе проведения испытаний скважин без участия квалифицированного интерпретатора в режиме реального времени [8–15].

В этой связи в работе для выделения фильтрационных потоков в процессе проведения испытаний горизонтальных скважин предлагается адаптивный метод диагностики с использованием модели (1).

Модели и алгоритмы адаптивного метода диагностики фильтрационных потоков

Основой предлагаемого адаптивного метода диагностики фильтрационных потоков является интегрированная система моделей (ИСМ) с учетом дополнительной априорной информации:

$$\begin{cases} y^*(t_n) = \alpha_1(t_n) + \alpha_2(t_n) \lg t_n + \xi_n, \\ h_{k,n} \bar{\alpha}_1 = \alpha_{1,n} + \eta_n, n = \overline{1, nk}, \end{cases} \quad (2)$$

где $y^*(t_n) = \ln\left(\frac{\Delta P^*(t_n) - \Delta P^*(t_{n-1})}{\ln t_n - \ln t_{n-1}}\right)$ – конечно-разностная аппроксимация ЛПЗД (1) на основе разности забойных давлений $\Delta P_3^*(t_n) = P_3^*(t_n) - P_3^*(t_0)$, полученных в процессе испытания скважины; $P_3^*(t_n), P_3^*(t_0)$ – значения забойных давлений в текущий момент времени t_n и в момент остановки скважины t_0 ; $\alpha_1(t_n), \alpha_2(t_n)$ – параметры, представленные неизвестными однозначными функциями дискретного времени t_n ; $\bar{\alpha}_1$ – дополнительная информация о параметре α_1 ; $h_{k,n}$ – параметр корректировки; t_{nk} – момент времени завершения испытаний скважины; ξ_n, η_n – случайные величины, представляющие разного рода погрешности и ошибки модели (2).

Для использования адаптивного метода идентификации модель (2) удобно представить в матричном виде

$$\begin{cases} \mathbf{y}_n^* = \mathbf{F}_0 \mathbf{\alpha}_n + \boldsymbol{\xi}_n, \\ \mathbf{\Gamma}_{k,n} \bar{\boldsymbol{\alpha}} = \mathbf{F}_a \mathbf{\alpha}_n + \mathbf{v}_n. \end{cases} \quad (3)$$

Тогда оптимальные оценки вектора параметров $\mathbf{\alpha}_n^* = (\alpha_1(t_n), \alpha_2(t_n))$ могут быть получены путем решения оптимизационной задачи [8–10]

$$\mathbf{\alpha}_n^* (\beta_n) = \arg \min_{\alpha_n} \Phi(\alpha_n, \beta_n), \quad (4)$$

где $\Phi = J_0 + J_a$ – общий показатель качества модели

(3); $J_0 = \|\mathbf{y}_n^* - \mathbf{F}_0 \mathbf{\alpha}_n\|_{\mathbf{W}(h_{3,n})}^2$ – критерий качества модели

$\mathbf{F}_0 \mathbf{\alpha}_n$ (3); $J_a = \mathbf{W}(h_{p,n}) \|\bar{\boldsymbol{\alpha}} - \mathbf{F}_a \mathbf{\alpha}_n\|_{\mathbf{\Gamma}_{k,n}}^2$ – показатель

качества модели $\mathbf{F}_a \mathbf{\alpha}_n$ (3); $\mathbf{y}_n^* = (y^*(t_n), n = \overline{1, nk})$ – вектор конечно-разностных значений ЛПЗД (2);

$\mathbf{F}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lg t_1 & \lg t_2 & \dots & \lg t_{nk} \end{pmatrix}$, $\mathbf{F}_a = \text{diag}(0, 1)$ – матрицы;

$\mathbf{W}(h_{3,n}) = \text{diag}(w_n((t_n - t_i) / h_{3,n}), i = \overline{1, nk})$ – матрица

значений весовой функции для формирования обучающего интервала обработки с параметром забывания $h_{3,n}$; $\bar{\boldsymbol{\alpha}} = (0, \bar{\alpha}_2)$ – вектор дополнительных сведений;

$\mathbf{\Gamma}_{k,n} = \text{diag}(0, h_{k,n})$ $\mathbf{W}(h_{p,n}) = \text{diag}(0, h_{p,n})$ – матрицы с параметрами корректировки и регуляризации;

$\beta_n = (h_{3,n}, h_{p,n}, h_{k,n})$ – вектор параметров забывания, регуляризации и корректировки соответственно; $\|\mathbf{x}\|_{\mathbf{W}}^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{W} \mathbf{x}$ – квадратичная норма вектора \mathbf{x} .

В табл. 2 приведены критерии адаптивного метода диагностики фильтрационных потоков в процессе проведения испытаний скважин, следующие из (2)–(4) и табл. 1.

Таблица 2

Критерии адаптивного метода диагностики фильтрационных потоков горизонтальных скважин

Фильтрационные потоки	Критерии адаптивного метода	Критерии моментов времени начала потоков
Ранний радиальный	$\alpha_2^*(\beta_n^*(t)) \approx 0$	$t_{\text{ppп}} = \arg \min_t \alpha_2^*(\beta_n^*(t)) $
Линейный	$\alpha_2^*(\beta_n^*(t)) = 0,5 \pm \Delta$, $\Delta = 0,1 \div 0,15$	$t_{\text{лп}} = \arg \min_t (\alpha_2^*(\beta_n^*(t)) - 0,5)$
Поздний радиальный	$\alpha_2^*(\beta_n^*(t)) \approx 0$ при $t > t_{\text{л}}$	$t_{\text{ppп}} = \arg \min_t \alpha_2^*(\beta_n^*(t)) $ при $t > t_{\text{л}}$

Результаты диагностики потоков по промышленным испытаниям скважин

Результаты исследований моделей и алгоритмов адаптивного метода выделения фильтрационных потоков по данным испытаний горизонтальных скважин нефтяного месторождения Иркутской области приведены на рис. 3–5 и в табл. 4. Исходные данные приведены в табл. 1 и на рис. 2.

На рис. 2 изображены фактические значения забойных давлений $P_3^*(t_i), i = \overline{1, n}$ (2), полученные в процессе проведения испытаний скважин, в полуло-

гарифмических координатах: $P_3^*(t_i)$ – по оси Y , $\lg t_i$ – по оси X .

Т а б л и ц а 3

Исходные данные горизонтальных скважин

Исходные данные	Скважины	
	№ 1	№ 2
1. Радиус скважины r_c , м	0,108	0,108
2. Пористость ϕ	0,13	0,13
3. Эффективная мощность h , м	5,4	7,2
4. Динамическая вязкость μ , сП	3,92	3,92
5. Температура при стандартном условии $T_{ст}$ (+20 °C) К	293	293
6. Пластовая температура $T_{пл}$, К	298	298
7. Сжимаемость системы пласта c_t , атм ⁻¹	$4,72 \cdot 10^{-4}$	$4,72 \cdot 10^{-4}$
8. Стандартное давление $P_{ст}$, атм	1,033	1,033
9. Дебит скважины до остановки q_0^* , м ³ /сут	137	163,2
10. Экспертная оценка пластового давления, атм	142	150
11. Экспертная оценка эффективной длины горизонтального ствола L , м	600	500
12. Экспертная оценка времени восстановления забойного давления до пластового \bar{T} , ч	300	500
13. Экспертная оценка латеральной проницаемости, мД	1100	300
14. Экспертная оценка проницаемости k_z , мД	14	12
15. Экспертная оценка проницаемости k_y , мД	1100	300
16. Наибольшее расстояние между скважиной и границей в направлении оси Z , D_z , м	2,7	3,6

На рис. 3, 4 приведены фактические $y^*(t_n)$ и восстановленные

$$\hat{y}(t_n) = \alpha_1^*(\beta_n(t_n)) + \alpha_2^*(\beta_n(t_n)) \lg t_n \quad (5)$$

значения ЛПЗД (2) в двойных логарифмических координатах (линии (1, 2) и оценки параметра $\alpha_2^*(\beta_n)$ модели (2) (линия 3) двух горизонтальных скважин, полученные путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛУ)

$$A_n \alpha_n^*(\beta_n) = B_n, \quad (6)$$

$$A_n = (F_0^T W(h_{3,n}) F_0 + F_a^T W(h_{p,n}) F_a),$$

$$B_n = (F_0^T W(h_{3,n}) y_n^* + F_a^T W(h_{p,n}) W(h_{k,n}) \bar{\alpha}).$$

Следует отметить, что при использовании квадратичных показателей качества оптимизационная задача (4) сводится к решению СЛУ (6) [14].

Расчет оценок параметров $\alpha_n^*(\beta_n)$ в (6) проводился при постоянных единичных значениях весовой функции $w((t_n - t_{n-i})/h_{3,n})$ в текущем интервале

обработки $[t_n - t_{n-4}]$, содержащем 5 значений забойного давления ($h_{3,n} = 5$), $(w_n((t_n - t_{n-i})/h_{3,n}) = 1$ при $t_n - t_{n-i} \leq h_{3,n} = t_n - t_{n-4}$ и $w_n((t_n - t_{n-i})/h_{3,n}) = 0$ при $(t_n - t_{n-i}) > h_{3,n}$, $i = \overline{0, n-1}$).

Оценки параметров корректировки $h_{k,n}^*$ определялись путем решения оптимизационной задачи

$$h_{k,n}^* = \arg \min_{h_{k,n}} \|y_n^* - F_0 \alpha_n(h_{k,n})\|_{w(h_{3,n})}^2 \quad (7)$$

методом дихотомии [17] при заданном значении параметра регуляризации $h_p = 0,01$.

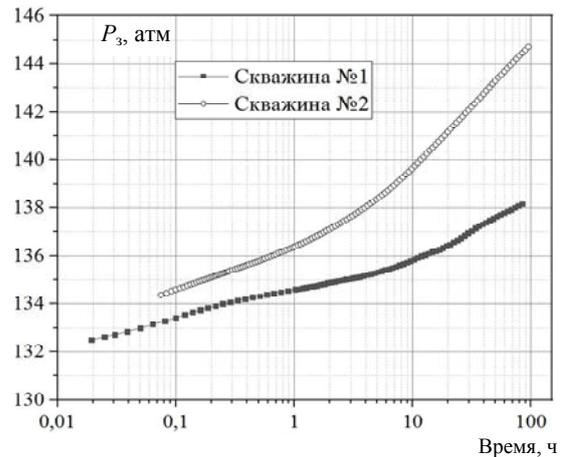


Рис. 2. Фактические значения забойных давлений горизонтальных скважин

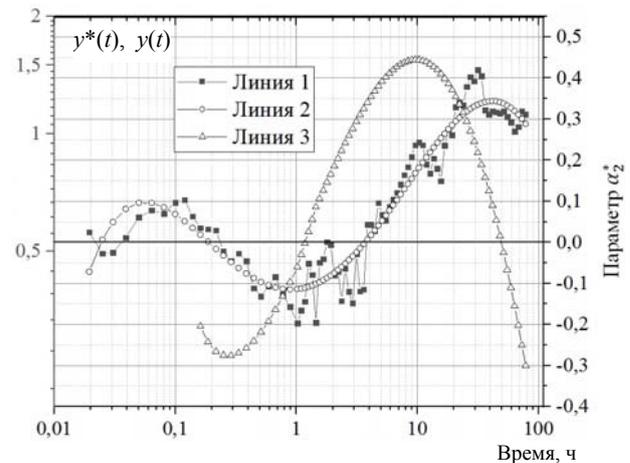


Рис. 3. Фактические (линия 1), восстановленные (линия 2) значения ЛПЗД и оценки параметра $\alpha_2^*(\beta_n)$ (линия 3) скважины № 1

На рис. 5 для примера приведены оценки параметра $\alpha_2^*(\beta_n)$ (линия 1) с использованием фактических $y^*(t_i)$ (2) и восстановленных (5) значений ЛПЗД скважины №2 (линия 2).

Из рис. 5 видно, что использование восстановленных значений ЛПЗД (6) позволяет получить более гладкие значения оценок параметра $\alpha_2^*(\beta_n)$, используемого в диагностических критериях, приведенных в табл. 2. Так, на участке раннего и позд-

него радиальных потоков параметр $\alpha_2^*(\beta_n)$ равен нулю, а в средней части линейного потока принимает значение, равное 0,35, что соответствует приведенным в табл. 2 критериям.

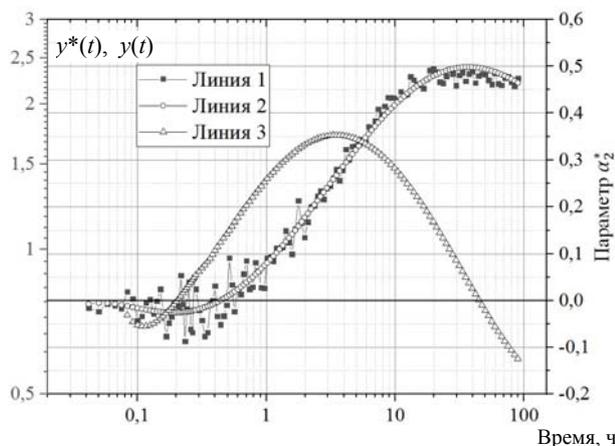


Рис. 4. Фактические (линия 1), восстановленные (линия 2) значения ЛПЗД и оценки параметра $\alpha_2^*(\beta_n)$ скважины № 2

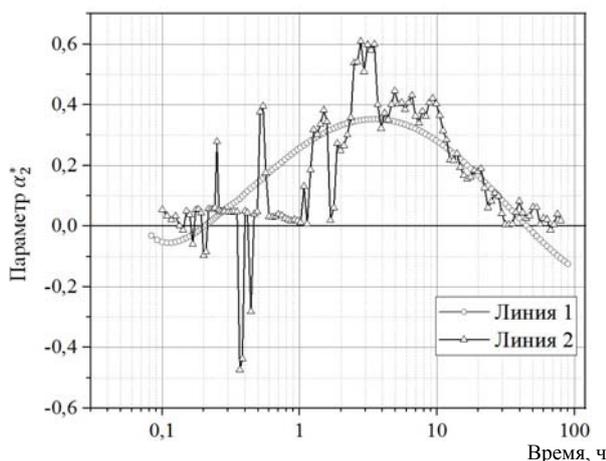


Рис. 5. Оценки параметра $\alpha_2^*(\beta_n)$ скважины № 2

В табл. 4 приведены результаты сравнительного анализа моментов времени начала фильтрационных потоков двух горизонтальных скважин графоаналитического, аналитического и адаптивного методов с использованием приведенных в табл. 2 экспертных значений проницаемости пласта.

Таблица 4

Результаты диагностики фильтрационных потоков горизонтальных скважин № 1 и 2

№ скважины	Метод диагностики потоков	Время начала потоков, ч		
		Ранний радиальный поток	Линейный поток	Поздний радиальный поток
1	Графоаналитический	0,8	1,2	40
	Аналитический	0,021	0,29	149,9
	Адаптивный	1,1	1,4	50,1
2	Графоаналитический	0,12	0,97	26,9
	Аналитический	0,065	0,6	381,8
	Адаптивный	0,25	1,1	30,95

В табл. 5 приведены относительные ошибки диагностики фильтрационных потоков аналитического и адаптивного методов и их средние значения. За точное время начала потоков принимается значение, полученное графоаналитическим методом (см. табл. 4).

Таблица 5

Относительные ошибки диагностики фильтрационных потоков горизонтальных скважин № 1 и 2

Метод диагностики потоков	№ скважины	Относительные ошибки диагностики потоков, %		
		Ранний радиальный поток	Линейный поток	Поздний радиальный поток
Аналитический	1	97,4	75,8	273,5
	2	45,8	38,1	1319
	Среднее значение	71,6	57	796,3
Адаптивный	1	37,5	16,7	25,3
	2	108,3	13,4	15,1
	Среднее значение	72,9	15,1	20,2

Анализ результатов, приведенных на рис. 3, 4 и в табл. 4, 5, показывает, что оценки времени начала фильтрационных потоков, полученные с использованием диагностических критериев графоаналитического и адаптивного методов, практически совпадают. Так, например, для скважины № 1 линейный поток появляется через час после остановки скважины, а заканчивается через 30 ч. Однако адаптивный метод позволяет определять фильтрационные потоки на кривой забойного давления горизонтальных скважин в процессе проведения испытаний в промысловых условиях.

Использование аналитического метода и экспертных оценок проницаемости пласта, приведенных в табл. 3, приводит к значительным ошибкам определения фильтрационных потоков (см. табл. 4, 5).

Выводы

Предложены модели и алгоритмы адаптивного метода диагностики фильтрационных потоков с использованием логарифмической производной забойного давления с переменными параметрами с учетом и корректировкой дополнительной информации и адаптивных алгоритмов идентификации для решения задачи параметрического синтеза в процессе проведения нестационарных исследований скважин с горизонтальным окончанием.

По результатам исследований двух скважин с горизонтальным окончанием нефтяного месторождения показано, что разработанные модели и алгоритмы диагностики не уступают по точности графоаналитическому методу и позволяют определять фильтрационные потоки в процессе проведения испытаний скважин.

Литература

1. Кременецкий М.И. Информационное обеспечение и технологии гидродинамического моделирования нефтя-

ных и газовых скважин / М.И. Кременецкий, А.И. Ипатов, Д.Н. Гуляев. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 896 с.

2. Bourdet D. Well test analysis: The use of advanced interpretation models. – Amsterdam: Elsevier Science, 2002. – 426 p.

3. Odeh A.S. Transient flow behavior of horizontal well: Pressure drawdown and buildup analysis / A.S. Odeh, D.K. Babu // Society of Petroleum Engineers. – 1990. – No. 18802. – P. 7–15.

4. Goode P.A. Pressure drawdown and buildup analysis of horizontal wells in anisotropic media / P.A. Goode, R.K.M. Thambynayagam // Society of Petroleum Engineers. – 1987. – No. 14250. – P. 683–697.

5. Escobar F.H. Conventional analysis for the determination of the horizontal permeability from the elliptical flow of horizontal wells / F.H. Escobar, M. Montelegrè // Society of Petroleum Engineers. – 2007. – No. 105928. – P. 1–8.

6. Bourdet D. Use of pressure derivative in well test interpretation / D. Bourdet, J.A. Ayoub, Y.M. Piard // Society of Petroleum Engineers. – 1984. – No. 12777. – P. 293–302.

7. Иктисанов В.А. Определение фильтрационных параметров пластов и реологических свойств дисперсных систем при разработке нефтяных месторождений. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2001. – 212 с.

8. Корилов А.М. Технология проектирования адаптивной системы идентификации и прогноза производственных процессов в условиях неопределенности / А.М. Корилов, В.Л. Сергеев, Д.В. Севостьянов, П.В. Сергеев, А.С. Аниканов // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 189–194.

9. Романова Е.В. Адаптивная идентификация кривой восстановления давления горизонтальных скважин с диагностикой потоков / Е.В. Романова, В.Л. Сергеев // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2013. – Т. 323, № 5. – С. 20–25.

10. Sergeev V.L. Adaptive identification and interpretation of pressure transient tests of horizontal wells: Challenges and perspectives / V.L. Sergeev, Dong Van Hoang // Proc. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 43, No. 1. – P. 1–6.

11. Сергеев В.Л. Идентификация фильтрационных потоков в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин с трещинами гидроразрыва пласта / В.Л. Сергеев, Донг Ван Хоанг // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 3. – С. 103–110.

12. Сергеев В.Л. К оптимизации адаптивных алгоритмов идентификации и интерпретации гидродинамических исследований с учетом влияния ствола скважины / В.Л. Сергеев, К.Д. Ву // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 98–102.

13. Гаврилов К.С. Адаптивная интерпретация нестационарных гидродинамических исследований скважин в системе «пласт–скважина» методом интегрированных моделей / К.С. Гаврилов, В.Л. Сергеев // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2012. – Е321, № 5. – С. 72–75.

14. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. – 198 с.

15. Сергеев В.Л. Метод адаптивной идентификации гидродинамических исследований скважин с учетом априорной информации / В.Л. Сергеев, А.С. Аниканов // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2010. – Т. 317, № 5. – С. 50–52.

16. Koshel R.J. Enhancement of the downhill simplex method of optimization // International Optical Design Conference. – 2002. – Vol. 4832. – P. 270–282.

17. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.

Сергеев Виктор Леонидович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-905-992-92-31
Эл. почта: SergeevVL1947@gmail.com

Донг Ван Хоанг

Аспирант отд. нефтегазового дела инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-153-44-99
Эл. почта: hoang.tpu@gmail.com

Хагай Данил Эдуардович

Зам. директора по геологии, ООО «Альтаир» Иркутский тракт, д. 71Д, г. Томск, Россия, 634062
Тел.: +7-999-316-00-00
Эл. почта: hagayd@mail.ru

Sergeev V.L., Dong V.H., Khagay D.E.

Models and algorithms of adaptive method to detect filtration flow during horizontal well testing

The article presents the solution that allows identifying filtration flow during horizontal well testing. The method is based on pressure buildup curve by using models of logarithmic derivatives of bottom-hole pressure and algorithms of adaptive identification. The results of comparative analysis of graph-analytical method, analytical method and proposed adaptive diagnostic method for filtration flow are based on field data of two horizontal wells.

Keywords: filtration flows, diagnostics, well test, pressure build-up curve, adaptation, identification, integrated systems of models, a priori information.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-90-95

References

1. Kremeneckij M.I., Ipatov A.I., Guljaev D.N. *Informacionnoe obespechenie i tehnologii gidrodinamicheskogo modelirovaniya nefjnyh i gazovyh skvazhin* [Information and technology of hydrodynamic modeling of oil and gas deposits]. Moscow, Izhevsk, Institute of computer research Press, 2012. 896 p. (in Russ.).

2. Bourdet D. Well test analysis: The use of advanced interpretation models. Amsterdam, Elsevier Science, 2002, 426 p.

3. Odeh A.S., Babu D.K. Transient flow behavior of horizontal well: Pressure drawdown and buildup analysis. *Society of Petroleum Engineers*, 1990, no. 18802, pp. 7–15.

4. Goode P.A., Thambynayagam R.K.M. Pressure drawdown and buildup analysis of horizontal wells in anisot-

ropic media. *Society of Petroleum Engineers*, 1987, no. 14250, pp. 683–697.

5. Escobar F.H., Montelegrè M. Conventional analysis for the determination of the horizontal permeability from the elliptical flow of horizontal wells. *Society of Petroleum Engineers*, 2007, no. 105928, pp. 1–8.

6. Bourdet D., Ayoub J.A., Piard Y.M. Use of pressure derivative in well test interpretation. *Society of Petroleum Engineers*, 1984, no. 12777, pp. 293–302.

7. Iktisanov V.A. *Opređenje filtracionnyh parametrov plastov i reologicheskikh svoystv dispersnyh sistem pri razrabotke nefijanyh mestorozhdenij* [Determination of reservoir parameters and rheological properties of dispersed systems in oil fields development]. Moscow, «VNIOJENG» Publ., 2001. 212 p.

8. Korikov A.M., Sergeev V.L., Sevostyanov D.V., Sergeev P.V., Anikanov A.S. Adaptive system of identification applied to stochastic models of industrial processes. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, no. 2(24), pp. 189–194 (in Russ.).

9. Romanova E.V. Sergeev V.L. Adaptive interpretation of pressure recovery curve of horizontal well with diagnostic flow. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 20–25 (in Russ.).

10. Sergeev V.L. Dong Van Hoang. Adaptive identification and interpretation of pressure transient tests of horizontal wells: Challenges and perspectives. *Proc. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 1, pp. 1–6.

11. Sergeev V.L. Dong Van Hoang. Identification of filtration flow regimes in hydrodynamic studies of horizontal wells with hydraulic fractures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 3, pp. 103–110 (in Russ.).

12. Sergeev V.L., Vu K.D. Optimization of adaptive algorithms for identification and interpretation of hydrodynamics research considering wellbore storage. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 98–102 (in Russ.).

13. Gavrillov K.S., Sergeev V.L. [Adaptive interpretation of transient well test in the «layer-well» system by the method of integrated models]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Uni-*

versity. Geo Assets Engineering, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 72–75 (in Russ.).

14. Sergeev V.L. *Integrirovannye sistemy identifikacii* [Integrated identification system]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2011. 198 p.

15. Sergeev V.L., Anikanov A.S. [The method of adaptive identification of wells test with a priori information]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2010, vol. 317, no. 5, pp. 50–52 (in Russ.).

16. Koshel R.J. Enhancement of the downhill simplex method of optimization. *International Optical Design Conference*, 2002, vol. 4832, pp. 270–282.

17. Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizacii v primerah i zadachah* [Optimization methods in examples and problems]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 2002, 544 p.

Viktor L. Sergeev

Doctor of Engineering, professor,
Department of Automated Control Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-905-992-92-31
Email: SergeevVL1947@gmail.com

Dong Van Hoang

PhD student, Division for Oil and Gas Engineering,
School of Earth Sciences & Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-153-44-99
Email: hoang.tpu@gmail.com

Khagay D.E.

Deputy Director for Geology, «Altair» Company
71D, Irkutskij st., Tomsk, Russia, 634062
Phone: +7-999-316-00-00
Email: hagayd@mail.ru

УДК 004.054; 519.81

Ю.П. Ехлаков, Н.В. Пермякова

Нечеткая когнитивная модель поддержки принятия решений на этапе мониторинга и управления рисками программных проектов

Предложена когнитивная модель определения альтернативных решений по выбору значимых рискообразующих факторов. Представлена постановка задачи в терминах нечетких систем с использованием математического аппарата нечеткой реляционной алгебры. Описан алгоритм получения множества альтернативных решений задачи, приведены результаты экспериментального исследования алгоритма на примере выбора критически важных факторов при реализации программы продвижения на рынок сервиса электронного расписания. Полученное в результате применения алгоритма решение позволило уменьшить число рассматриваемых рискообразующих факторов, что в свою очередь приведет к снижению бюджетной нагрузки на реализацию программы продвижения.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, когнитивная карта, управление рисками, программные проекты.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-96-103

Согласно рекомендациям стандартов по проектному управлению [1–12] при выборе стратегии одним из важных этапов управления рисками является определение множества рискообразующих факторов, требующих немедленного реагирования. Здесь и далее под риском будем понимать неопределенное событие или условие, наступление которого отрицательно или положительно сказывается на целях проекта, таких как содержание, расписание, стоимость и качество [1]. Проявление риска связано с возникновением некоторых событий, которые могут рассматриваться как признаки угрозы проекту, опасности потерь или провала проекта. Такие явления принято называть рискообразующими факторами. Логично предположить, что выполнение мероприятий, воздействующих на такие факторы должно снизить и уровень рисков проекта. Вместе с тем реализация мероприятий может повлечь за собой появление новых рискообразующих факторов. В этом случае менеджеру проекта необходимо рассматривать рискообразующие факторы в динамике с учетом их возможных взаимосвязей, своевременно контролировать состояние как ранее идентифицированных рискообразующих факторов, так и новых, вносить изменения (корректировки) как в множество значимых факторов, так и в перечень первоначально выделенных мероприятий в контексте текущего этапа проекта.

В связи с этим возникает необходимость выбора инструментария, позволяющего рассматривать возможные изменения риска и рискообразующих факторов в динамике, с учетом наличия взаимосвязей между ними. В качестве математического аппарата решения этой задачи в работе предлагается использовать нечеткое когнитивное моделирование (нечеткие когнитивные карты), частным случаем которого является построение нечетко-целевой когнитивной модели для принятия стратегических решений [13–18].

Основу когнитивного моделирования составляет когнитивная карта ситуации, которая представляется в виде взвешенного ориентированного графа.

Вершинами графа является множество объектов, участвующих в ситуации (концепты когнитивной карты). Множество дуг графа, соединяющих вершины, отражает взаимосвязь концептов. Вес дуги характеризует силу связи между концептами и может быть как положительным, так и отрицательным и является показателем интенсивности влияния. Концепты когнитивных карт подразделяются на целевые – описывающие целевое состояние системы, и управляющие – являющиеся потенциально возможными рычагами воздействия на изменение целевого состояния системы. В данном случае в качестве целевых концептов рассматриваются возможные риски программного проекта, а в качестве управляющих концептов – рискообразующие факторы, влияющие на возможное возникновение рисков.

Использование когнитивного моделирования для решения подобного класса задач позволит проводить последовательный анализ причинно-следственных связей между рисками и рискообразующими факторами, идентифицировать и оценивать влияние рискообразующих факторов на различные ситуации при реализации плановых мероприятий, генерировать возможные варианты решений, планировать упреждающие действия по предотвращению потенциально опасных ситуаций при возникновении новых рискообразующих факторов.

Постановка задачи

Риск-менеджер проекта выделил риски программного проекта $A = \{a_i\}, i = \overline{1, \alpha}$ и идентифицировал рискообразующие факторы, способствующие возникновению каждого из рисков $Z = \{z_j\}, j = \overline{1, m}$. На начальном этапе управления рисками риск-менеджер:

- определил для рисков и рискообразующих факторов вероятность проявления в виде множества $P = \{p_j\} \cup \{p_i\}$;
- для каждого рискообразующего фактора z_j сформировал перечень возможных мероприятий $M = \{\{m_1, m_2, \dots, m_l, \dots, m_{nj}\}_k\}, nj = 1, 2, \dots$, выполнение

которых позволит снизить вероятность их наступления;

- оценил для каждого фактора z_j прогнозное изменение вероятности проявления после выполнения мероприятия u_i в виде множества $\Delta P = \{\Delta p_{ji}\}$.

Требуется из перечня возможных мероприятий M выделить множество плановых мероприятий, $M^* = \{m^g\}_k, k=1,2,\dots$, выполнение которых позволит достичь желаемых значений вероятности наступления риска $P^g = \{p_i^g\}$. Желаемые значения вероятности проявления рисков определяются в соответствии с пороговым значением риска проекта (риск-аппетита).

В терминах нечетких систем эта задача может быть представлена в следующем виде.

Для оценки вероятности рисков и рискообразующих факторов риск-менеджер проекта определяет качественную шкалу измерения в виде лингвистической переменной, которая задается следующим кортежем $\langle p, T_p, X_p, M_p \rangle$, где p – имя лингвистической переменной, T_p – множество термов лингвистической переменной, мощность которого зависит от количества градаций качественной шкалы, используемой для оценки, X_p – универсум нечетких переменных, M_p – семантическая процедура, формирующая нечеткие множества для каждого возможного значения переменной, используя при этом функции принадлежности, параметры которых определяются экспертами [19].

Для измерения интенсивности влияния рисков и рискообразующих факторов друг на друга определяется лингвистическая переменная $\langle w, T_w, X_w, M_w \rangle$, где мощность множества термов T_w соответствует количеству качественных градаций оценки силы влияния, универсум нечетких переменных X_w определяется как интервал $[-1, 1]$.

Описание причинно-следственных связей, отражающих взаимовлияния рисков и рискообразующих факторов, сводится к построению ориентированного графа $G(E, W)$, в котором множество вершин $E = A \cup Z^u$ является множеством концептов, а множество дуг W , соединяющих вершины, отражает направление влияния концептов. Вес дуги $w_{ij} = w(e_i, e_j)$, $w_{ij} \in T_w$ характеризует силу связи между концептами. Формально когнитивная карта представляется когнитивной нечеткой матрицей $\mathbf{W} = [w_{ij}]_{n \times n}$, $n = |E|$.

Риск-менеджер проекта выделяет в ориентированном графе $G(E, W)$ один или несколько рисков $a_i \in E$ в качестве целевого концепта/концептов и множество рискообразующих факторов $z_i \in E$, влияющих на возможное возникновение риска / рисков в качестве управляющих концептов.

Взаимовлияние концептов, отраженное в $G(E, W)$, позволяет предположить, что выполнение мероприятий приведет к изменению вероятности управляющих концептов (рискообразующих факторов) и как следствие к изменению и вероятности целевых концептов (рисков). Согласно [13] этот процесс определяется по правилу

$$\mathbf{s}^T(t+1) = \mathbf{s}^T(t) \circ \mathbf{W}, \quad (1)$$

где $\mathbf{s}(t)$ – вектор состояний когнитивной карты, $\mathbf{W} = [w_{ij}]_{n \times n}$ когнитивная нечеткая матрица, \circ – операция макстриангулярной композиции.

Двойка $\langle \mathbf{s}^T(t), \mathbf{W} \rangle$ называется когнитивной системой.

При разделении вектора состояний когнитивной системы на векторы управляемых концептов – $\mathbf{u}(t)$, концептов состояний – $\mathbf{x}(t)$, выходных (целевых) концептов – $\mathbf{y}(t)$ и соответствующем разделении матрицы \mathbf{W} на матрицы \mathbf{A} – состояния, \mathbf{B} – управления и \mathbf{C} – выхода выражение (1) может быть представлено как

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) &= \mathbf{A} \circ \mathbf{x}(t) \vee \mathbf{B} \circ \mathbf{u}(t), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \circ \mathbf{x}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где \vee – операция max.

Если управляющие факторы напрямую воздействуют на целевые концепты, то уравнение, соответствующее выходам, примет вид

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \circ \mathbf{x}(t) \vee \mathbf{D} \circ \mathbf{u}(t), \quad (3)$$

где \mathbf{D} – матрица, связывающая управляющие и целевые концепты.

Система, описанная выражениями (2), (3), называется управляемой когнитивной системой [13].

На текущем этапе управления рисками менеджер проекта должен задать значения векторов $\mathbf{x}(t)$ как соответствующие элементы множества P и вектор \mathbf{g}_y , содержащий желаемые значения вероятностей наступления рисков из множества P_g .

Необходимо найти множество непустых векторов решений $U = \{\mathbf{u}^q | q > 0\}$, которое обеспечит решение матричного уравнения

$$\mathbf{g}_y = \mathbf{Pm} \circ \mathbf{u}, \quad (4)$$

где $\mathbf{u} \in U$, $\mathbf{Pm} = \mathbf{C} \circ \mathbf{A}^* \circ \mathbf{B} \vee \mathbf{D}$ – передаточная матрица, \mathbf{A}^* – транзитивное замыкание матрицы \mathbf{A} .

Выражение (4) представляет собой нечеткое реляционное уравнение, которое имеет одну верхнюю границу решения и множество нижних решений [13, 20]. Таким образом, задача поддержки принятия решений сводится к решению уравнения (4) и заключается в поиске множества начальных векторов управляющих концептов – рискообразующих факторов при заданном нечетком векторе цели – желаемых значениях вероятности наступления рисков.

Алгоритм формирования множества возможных альтернативных решений

Для определения условия формирования множества альтернативных решений введем следующие определения нечеткой математики [13].

Нечеткая матрица

$$\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times m}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m, a_{ij} \in [0, 1].$$

T-норма

Функция $T: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ такая, что для всех

$x, y, z \in [0, 1]$ выполняются условия:

1. $T(0, x) = 0$.
2. $T(1, x) = 1$.
3. $T(x, y) = T(y, x)$.
4. $T(x, y) \leq T(x, z)$ если $y \leq z$.
5. $T(T(x, y), z) = T(x, T(y, z))$.

Макстриангулярная композиция

(*T-произведение*)

$$\mathbf{R} \circ \mathbf{Q} = \left[\bigvee_{j=1}^m r_{ij} T q_{jk} \right]_{n \times l},$$

где $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{n \times m}$ и $\mathbf{Q} = [q_{jk}]_{m \times l}$ – нечеткие матрицы.

Транзитивное замыкание – \mathbf{A}^* – может быть найдено как

$$\mathbf{A}^* = \bigvee_{k=1}^{\infty} \mathbf{A}^k,$$

где $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$ – нечеткая матрица.

Псевдообратная функция

$$f^{(-1)}(y) = \begin{cases} f^{(-1)}(y), & y \in [0, f(0)] \\ 0, & y \in (f(0), \infty) \end{cases}.$$

Операция определения псевдообратного элемента. Элемент c называется псевдообратным элементу a относительно b , если c – наибольший элемент со свойствами $a T c \leq b$, $a, b \in [0, 1]$.

Операция определения псевдообратного элемента обозначается φ .

Композиция φ нечетких матриц определяется как

$$\mathbf{R} \varphi \mathbf{Q} = \left[\bigwedge_{j=1}^m r_{ij} \varphi q_{jk} \right]_{n \times l}.$$

Вектор $\varphi(a)$ и множество векторов $\Phi(a)$

Пусть дан нечеткий вектор $a = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T$.

Множество $\Phi(a)$ векторов $\varphi(a)$ –

$$\Phi(a) = \{\varphi(a)\},$$

где $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)^T$, $\exists i: \varphi_i = a_i, \forall j \neq i \varphi_j = 0; \bigvee_{k=1}^m \varphi(a_k) = a$.

β -композиция

$$\forall a, b \in [0, 1], a \beta b = \begin{cases} 0, & a < b, \\ b, & a \leq b. \end{cases}$$

ε -композиция

$$\forall a, b \in [0, 1], a \varepsilon b = \begin{cases} 0, & a < b \\ f^{(-1)}(f(a) - f(b)), & a \leq b. \end{cases}$$

δ -композиция

$\mathbf{R} = [r_{ij}]_{m \times m}$ – нечеткая матрица,

$\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ – нечеткий вектор.

$$\mathbf{R} \delta \mathbf{b} = \mathbf{S} = [s_{ij}]_{m \times n}$$

$$s_{ij} = \left(\bigwedge_{k=1}^n (r_{ik} \varphi b_k) \right) \beta (r_{ij} \varepsilon b_j).$$

Множество решений уравнения (4) определяется из условия

$$\forall \varphi(\mathbf{Pm}^T \delta \mathbf{g}_y) \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{Pm}^T \hat{\varphi} \mathbf{g}_y,$$

$$\forall \varphi(\mathbf{Pm}^T \delta \mathbf{g}_y) \in \Phi(\mathbf{Pm}^T \delta \mathbf{g}_y),$$

где $\mathbf{Pm}^T \hat{\varphi} \mathbf{g}_y$ – верхняя граница решения уравнения (4), $\forall \varphi(\mathbf{Pm}^T \delta \mathbf{g}_y)$ – множество нижних границ уравнения (4).

С учетом введенных обозначений алгоритм поиска возможных альтернативных решений может быть представлен в виде следующей последовательности:

Шаг 1. Определение значений вектора целей \mathbf{g}_y .

Шаг 2. Разделение матрицы \mathbf{W} . Получение матриц \mathbf{A} , \mathbf{C} , \mathbf{B} .

Шаг 3. Получение матрицы транзитивного замыкания \mathbf{A}^ .*

Шаг 4. Определение передаточной матрицы Pm .

Шаг 5. Получение верхней границы решения

$$\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{Pm}^T \hat{\varphi} \mathbf{g}_y.$$

Шаг 7. Получение множества нижних решений $\forall \varphi(\mathbf{Pm}^T \delta \mathbf{g}_y)$.

Апробация и экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования предложенных модели и алгоритма проводились на примере формирования множества альтернатив возможных решений при управлении рисками этапа продвижения программного продукта (ПП) «Сервис ведения электронного расписания FlipTable». Разработанный ПП может быть предоставлен потенциальным потребителям по двум бизнес-моделям – программное обеспечение как сервис (SaaS) и как свободное программное обеспечение (СПО) [21]. Основываясь на положительном опыте внедрения сервиса как одного из компонентов электронно-информационной образовательной среды в ТУСУР, коллективом разработчиков были проведены маркетинговые исследования и принято решение о продвижении ПП в образовательные организации Кемеровской области, при этом для профессиональных образовательных организаций (ПОУ) предлагается SaaS-версия, для высших учебных заведений (вузы) – СПО-версия [22].

В качестве инструментов интернет-маркетинга были выбраны рекламные площадки Кемеровской области. Возможный риск реализации программы продвижения был определен как «срыв плана по количеству продаж в заданном интервале времени реализации программы продвижения». Для оценки вероятности проявления рисков и рискообразующих факторов и интенсивности их влияния друг на друга использовались качественные шкалы.

Множество рискообразующих факторов, способствующих наступлению риска, и вероятность их возможного проявления представлены в табл. 1.

Таблица 1
Значимые рискообразующие факторы

Обозначение	Фактор	Вероятность
z_1	Изменение нормативного регулирования бизнес-процессов у потенциальных потребителей	Средняя
z_2	Появление на рынке новых аналогичных продуктов	Высокая
z_3	Пиратское распространение копий ПП	Очень низкая
z_4	Несоответствие функциональных характеристик ПП потребностям потребителей	Средняя
z_5	Несоответствие предлагаемой цены ПП ожиданиям потребителей	Высокая
z_6	Недостаточные навыки владения исполнителями информационными технологиями продвижения	Средняя
z_7	Ошибочный выбор целевого сегмента	Очень высокая
z_8	Ошибки в расчетах финансовых затрат на продвижение	Высокая
z_9	Ошибки при выборе потребительских предпочтений	Очень высокая
z_{10}	Ошибки выбора каналов и инструментов коммуникаций	Высокая
z_{11}	Недостаточная проработка коммуникационных сообщений	Очень высокая
z_{12}	Низкий уровень организации обратной связи	Средняя

В соответствии с выбранной шкалой оценивания определены лингвистические переменные «Вероятность проявления» (табл. 2) и «Интенсивность влияния» (табл. 3).

Соответственно графики функций принадлежности термов лингвистической переменной «Вероятность проявления» и «Интенсивность влияния» представлены на рис. 1 и 2.

Таблица 2

Терм/ категория	Вероятность проявления	
	Интервал	Функция принадлежности
Очень низкая	0–0,2	$\mu_1^p(x) = \begin{cases} 1, & x < 0 \\ 1 - \frac{x}{0,2}, & 0 \leq x < 0,2 \\ 0, & x \geq 0,2 \end{cases}$
Низкая	0,1–0,4	$\mu_2^p(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,1 \\ 1 - \frac{0,2-x}{0,1}, & 0,1 \leq x < 0,2 \\ 1, & 0,2 \leq x < 0,3 \\ 1 - \frac{x-0,3}{0,1}, & 0,3 \leq x < 0,4 \\ 0, & x \geq 0,4 \end{cases}$
Средняя	0,3–0,6	$\mu_3^p(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,3 \\ 1 - \frac{0,4-x}{0,1}, & 0,3 \leq x < 0,4 \\ 1, & 0,4 \leq x < 0,5 \\ 1 - \frac{x-0,5}{0,1}, & 0,5 \leq x < 0,6 \\ 0, & x \geq 0,6 \end{cases}$
Высокая	0,5–0,8	$\mu_4^p(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,5 \\ 1 - \frac{0,6-x}{0,1}, & 0,5 \leq x < 0,6 \\ 1, & 0,6 \leq x < 0,7 \\ 1 - \frac{x-0,7}{0,1}, & 0,7 \leq x < 0,8 \\ 0, & x \geq 0,8 \end{cases}$
Очень высокая	0,7–1	$\mu_5^p(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,7 \\ \frac{x-0,7}{0,3}, & 0,7 \leq x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases}$

Таблица 3

Терм/ категория	Интенсивность влияния	
	Интервал	Функция принадлежности
Слабая	0–0,4	$\mu_1^w(x) = \begin{cases} 1, & x < 0 \\ 1 - \frac{x}{0,4}, & 0 \leq x < 0,4 \\ 0, & x \geq 0,4 \end{cases}$
Средняя	0,3–0,7	$\mu_2^w(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,3 \\ 1 - \frac{0,4-x}{0,1}, & 0,3 \leq x < 0,4 \\ 1, & 0,4 \leq x < 0,5 \\ 1 - \frac{x-0,5}{0,2}, & 0,5 \leq x < 0,7 \\ 0, & x \geq 0,7 \end{cases}$
Высокая	0,6–1	$\mu_3^w(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,6 \\ \frac{x-0,6}{0,4}, & 0,6 \leq x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases}$

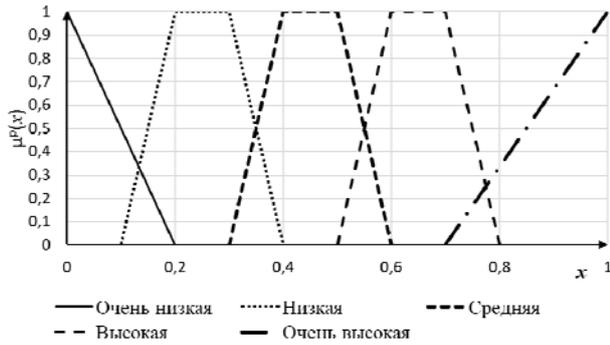


Рис. 1. Графики функций принадлежности термов лингвистической переменной «Вероятность проявления»

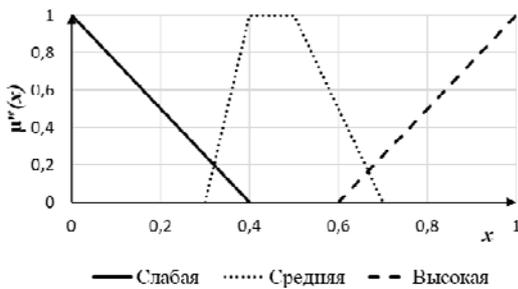


Рис. 2. Графики функций принадлежности термов лингвистической переменной «Интенсивность влияния»

Когнитивная карта взаимовлияния риска и рискообразующих факторов представлена на рис. 3, а соответствующая ее структуре когнитивная матрица W , определяющая интенсивность влияния концептов, на рис. 4. Интенсивность влияния определялась согласно шкале, представленной в табл. 2.

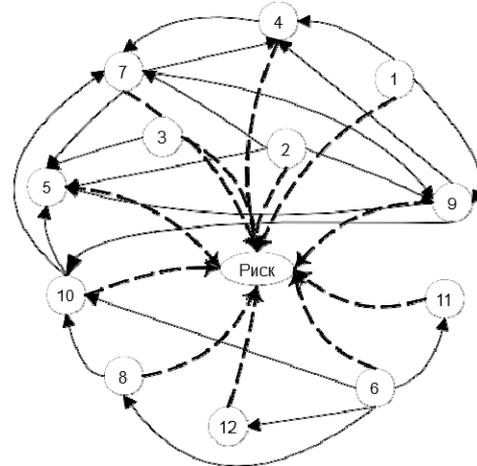


Рис. 3. Когнитивная карта взаимовлияния риска и рискообразующих факторов

	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9	z_{10}	z_{11}	z_{12}	Риск
z_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0	0	0	0,5
z_2	0	0	0	0	0,5	0	1	0	0,7	0	0	0	0,4
z_3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,1
z_4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,9
z_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8
z_6	z_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7	0,7	0,7	0,6
z_7	0	0	0	0,9	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0,8
z_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0	0	0,7
z_9	0	0	0	0,9	0,8	0	0	0	0	0,8	0	0	0,3
z_{10}	0	0	0	0	0,3	0	0,9	0	0	0	0	0	0,4
z_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3
z_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3
Риск	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 4. Когнитивная матрица W , определяющая интенсивность влияния концептов

На текущем этапе выполнения программы вероятность проявления риска оценена как «высокая» (0,8). Было принято начальное условие, что для успешного завершения программы продвижения вероятность возможного риска не должна превышать значения 0,1 («очень низкая»). Управляемыми концептами выбраны рискообразующие факторы $z_6 - z_{12}$. Необходимо найти решение уравнения (3), являющееся множеством векторов $u = \{ [\Delta p_1^{z_3}, \Delta p_1^{z_4}, \dots, \Delta p_1^{z_{12}}], [\Delta p_2^{z_3}, \Delta p_2^{z_4}, \dots, \Delta p_2^{z_{12}}], \dots \}$, значения которых $\Delta p_k^{z_j}$ – изменения оценок вероятностей наступления управляемых факторов z_j в решении k .

В дальнейших расчетах в качестве T -нормы использовалась T -норма Лукасевича

$$T(x, y) = \sqrt{x + y - 1, 0}$$

и операция определения псевдообратного элемента

$$a \circ b = \begin{cases} 1, a \leq b, \\ b, a > b. \end{cases}$$

Шаг 1. Определение вектора целей – желаемое значение целевого концепта «Риск»

$$g_y = [0,7] - \text{вероятность риска.}$$

Шаг 2. Разделение матрицы W

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,8 & 0 & 0,8 & 0,3 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$C = (0,5 \ 0,4 \ 0,1 \ 0,9 \ 0,8),$$

$$D = (0,6 \ 0,8 \ 0,7 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,3 \ 0,3).$$

Шаг 3. Получение матрицы транзитивного замыкания

$$A^* = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Шаг 4. Определение передаточной матрицы

$$C \circ A^* = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,1),$$

$$Pm = C \circ A^* \circ B \vee D = (0,6 \ 0,8 \ 0,7 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,3 \ 0,3).$$

Шаг 5. Получение верхней границы решения

$$\hat{u} = (-1 \ -0,9 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1).$$

Полученное решение позволяет сделать вывод, о том, что снижение уровня риска реализации программы продвижения может быть достигнуто при выполнении мероприятий, направленных на уменьшение вероятности всех рискообразующих факторов, определенных ранее в качестве управляемых концептов. Значения вектора $\hat{u} \in [-1; -0,9]$ говорят о том, что выполнение на текущем этапе реализации программы продвижения плановых мероприятий

$$M^* = \left\{ \left\{ m_{z_6}^g, m_{z_7}^g, m_{z_8}^g, m_{z_9}^g, m_{z_{10}}^g, m_{z_{11}}^g, m_{z_{12}}^g \right\}_{\hat{u}} \right\}$$

должно привести к полной нейтрализации факторов: z_6 – недостаточные навыки владения исполнителями информационными технологиями продвижения, z_7 – ошибочный выбор целевого сегмента, z_8 – ошибки в расчетах финансовых затрат на продвижение, z_9 – ошибки при выборе потребительских предпочтений, z_{10} – ошибки выбора каналов и инструментов коммуникаций, z_{11} – недостаточная проработка коммуникационных сообщений, z_{12} – низкий уровень организации обратной связи.

Динамика изменения вероятностей риска и рискообразующих факторов при принятии такого решения показана на рис. 5. Наряду с уменьшением вероятности управляемых рискообразующих факторов реализация мероприятий положительно повлияет и на факторы z_4 – несоответствие функциональных характеристик ПП потребностям потребителей и z_5 – несоответствие предлагаемой цены ПП ожиданиям потребителей.

Шаг 6. Получение множества нижних границ решения.

План мероприятий M^* по реагированию на все управляемые рискообразующие факторы может привести к большим затратам. Поэтому для возможного снижения затрат без потери качества снижения уровня риска целесообразно получить и проанализировать

нижние границы решения. В данном случае было найдено два нижних решения:

$$u_1 = (0 \ -0,9 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0),$$

$$u_2 = (0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0).$$

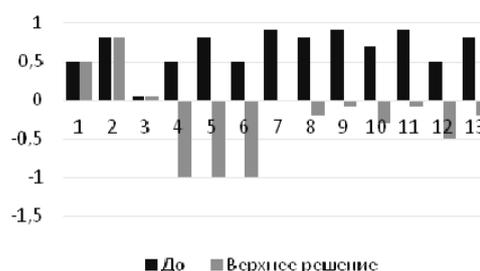


Рис. 5. Динамика изменения вероятностей риска и рискообразующих факторов при принятии верхнего решения

На основании нижних решений можно сделать вывод о том, что в текущем интервале реализации программы продвижения можно включать в план мероприятий M^* мероприятия только по нейтрализации фактора, z_7 – ошибочный выбор целевого сегмента (согласно решению u_1) и z_8 – ошибки в расчетах финансовых затрат на продвижение (согласно решению u_2).

Динамика изменения вероятностей риска и рискообразующих факторов приведена на рис. 6. Первое нижнее решение так же, как и верхнее, положительно влияет на факторы z_4 и z_5 . Второе нижнее решение положительно влияет только на целевой фактор – риск срыва плана по количеству продаж в заданном интервале времени реализации программы продвижения.

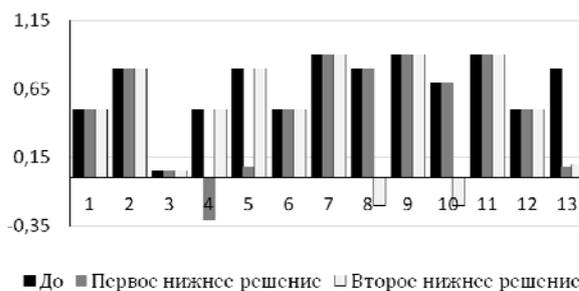


Рис. 6. Динамика изменения риска и рискообразующих факторов при принятии нижних решений

Полученные решения были приняты командой разработчиков в качестве рекомендаций по реагированию на возможные негативные проявления выделенных критичных рискообразующих факторов при продвижении ПП, в табл. 4 приведен перечень плановых мероприятий.

Заключение

Предложенный подход к управлению рисками программных проектов, основанный на нечетких когнитивных моделях и математическом аппарате нечеткой реляционной алгебры, позволяет из множества идентифицированных рискообразующих факторов, влияющих на риск, выделить и оценить

альтернативные варианты решений по выбору рискообразующих факторов, требующих немедленного реагирования.

Таблица 4

Перечень мероприятий	
Фактор	Мероприятия
z_7 – ошибочный выбор целевого сегмента	Уточнение профиля выделенного сегмента (требования потенциальных покупателей к ПП, потребности покупателей, ценовой сегмент). Проведение пробных продаж
z_8 – ошибки в расчетах финансовых затрат на продвижение	Уточнение маркетингового комплекса программы продвижения с учетом профиля выбранного целевого сегмента – выбор средств рекламной кампании, содержания и длительности рекламы. Детальный анализ сведений по статистике и конверсиям на планируемых рекламных площадках. Применение методики волнового планирования

Анализ результатов практической апробации позволяет сделать вывод о пригодности предложенной модели и алгоритма для решения практических задач. Сформированное на основе нижних границ решение позволило команде проекта сократить на 70% число рискообразующих факторов, влияющих на риск срыва плана по количеству продаж в заданном интервале времени реализации программы продвижения, при условии, что вероятность возможного риска не должна превышать значения 0,1 («очень низкая»). В свою очередь, предлагаемое решение приведет к снижению бюджетной нагрузки на реализацию программы продвижения.

В практическом плане материалы статьи могут быть использованы руководителями малых ИТ-компаний и риск-менеджерами программных проектов на этапе мониторинга и управления рисками для выделения значимых факторов, требующих немедленного реагирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 8.8184.2017/8.9.

Литература

1. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК). – 4-е изд. – М.: Project Management Institute, 2013. – 586 с.
2. BS 6079-1:2010 Project management. Part 3: Guide to the management of business related project risk. – London: BSI, 2003. – 27 p.
3. Ярошенко Ф.А. Р2М. Управление инновационными проектами и программами / Ф.А. Ярошенко, С.Д. Бушнев, Х. Танака. – СПб.: Проф-лит., 2015. – 320 с.
4. APM. Body of knowledge, 6-th edition [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.apm.org.uk/body-of-knowledge/>, свободный (дата обращения: 09.08.2018).
5. DIN 69901-1 Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil1: Grundlagen. – Berlin: Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN, 2009. – 30 p.
6. Hinde D. PRINCE 2. Study Guide / D. Hinde – New Jersey: John Wiley and Sons, Ltd, 2012. – 528 p.

7. ГОСТ Р 54869–2011. Требования к управлению проектом. – М.: Стандартинформ, 2011. – 14 с.

8. ГОСТ Р ИСО 21500–2014. Руководство по проектному менеджменту. – М.: Стандартинформ, 2014. – 50 с.

9. ГОСТ Р ИСО 10006–2005. Руководство по менеджменту качества при проектировании. – М.: Стандартинформ, 2005. – 28 с.

10. ISO 1006:2017. Quality Management Systems: Guidelines for Quality Management in Projects [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10006:ed-3:v1:en>, свободный (дата обращения: 09.08.2018).

11. ГОСТ Р ИСО 31000–2010. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.

12. ISO 31000:2009. Risk management – Principles and guidelines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/ru/standard/43170.html>, свободный (дата обращения: 09.08.2018).

13. Силев В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. – М.: ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.

14. Максимов В.И. Когнитивные технологии для поддержки принятия управленческих решений / В.И. Максимов, Е.К. Корноушенко, С.В. Качаев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/bpa/092aa276c601a997c32568c0003ab839>, свободный (дата обращения: 20.01.2016).

15. Пылькин А.Н. Методология когнитивного анализа в вопросах автоматизации управления материальными потоками / А.Н. Пылькин, А.В. Крошили, С.В. Крошлина // Информатика и системы управления. – 2012. – № 2(32). – С. 138–149.

16. Максимов В.И. Анализ и управление в нестабильной среде / В.И. Максимов, С.В. Качаев, Е.К. Корноушенко // Банковские технологии. – 1999. – № 3. – С. 47–52.

17. Chen Z. Impacts of risk attitude and outside option on compensation contracts under different information structures / Z. Chen, Y. Lan, R. Zhao // Fuzzy Optimization and Decision Making. – 2018. – Vol. 17, Iss. 1. – P. 13-47.

18. Linguistic fuzzy consensus model for collaborative development of fuzzy cognitive maps: a case study in software development risks / C. De Maio, G. Fenza, V. Loia, F. Orciuoli // Fuzzy Optimization and Decision Making. – 2017. – Vol. 16, Iss. 4. – P. 463–479.

19. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее роль в принятии приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 168 с.

20. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения / С.Л. Блюмин, И.А. Шуйкова, П.В. Сараев, И.В. Черпаков. – Липецк: ЛЭГИ, 2002. – 113 с.

21. Бараксанов Д.Н. Математическое и программное обеспечение поддержки принятия решений при продвижении программного продукта на корпоративный рынок: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2016. – 186 с.

22. Ехлаков Ю.П. Математическая модель и алгоритм выбора интернет-площадок и мест размещения коммуникационных сообщений при организации рекламных кампаний / Ю.П. Ехлаков, Д.Н. Бараксанов // Бизнес-информатика. – 2017. – № 1. – С. 55–60.

Ехлаков Юрий Поликарпович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизации обработки информации (АОИ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр., д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-41-31
Эл. почта: ure@tusur.ru

Пермякова Наталья Викторовна

аспирант каф. АОИ ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 41-47-01

Эл. почта: pnv@muma.tusur.ru

Ehlaikov Yu.P., Permyakova N.V.

Fuzzy cognitive model of decision support at the stage of monitoring and risk management of software projects

The article proposes a cognitive model to determine alternative solutions for the choice of significant risk-forming factors. The problem is presented in terms of fuzzy systems using the mathematical apparatus of fuzzy relational algebra. An algorithm for obtaining a set of alternative solutions to the problem is described, the results of an experimental study of the algorithm are given using the example of choosing critical factors when implementing a program to promote an electronic timetable service to the market. The solution obtained as a result of applying the algorithm reduced the number of risk-forming factors under consideration, which in turn will reduce the budget burden on the implementation of the promotion program.

Keywords: cognitive modeling, cognitive map, risk management, software projects.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-96-103

References

1. *Rukovodstvo k Svodu znaniy po upravleniyu proektami (Rukovodstvo PMBOK)* [Guide to the Project Management Body of Knowledge (Guide PMBOK)]. 4-e izd. M., Project Management Institute, 2013. 586 p.
2. BS 6079-1:2010 Project management. Part 3: Guide to the management of business related project risk. London, BSI, 2003. 27 p.
3. Yaroshenko F.A., Bushuev S.D., Tanaka H. *P2M. Upravlenie innovatsionnymi proektami i programmami* [P2M. Management of innovative projects and programs]. Saint-Petersburg, Prof-lit, 2015. 320 p.
4. APM. Body of knowledge, 6-th edition. Available at: <https://www.apm.org.uk/body-of-knowledge> (Accessed: June 9, 2019).
5. DIN 69901-1 Projektmanagement. Projektmanagementsysteme. Teil1: Grundlagen. Berlin, Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN. 2009. 30 p.
6. Hinde D. PRINCE 2. Study Guide. New Jersey, John Wiley and Sons, Ltd, 2012. 528 p.
7. GOST R 54869–2011 *Trebovaniya k upravleniyu proektom* [Project management requirements]. Moscow, Standartinform, 2011. 14 p.
8. GOST R ISO 21500–2014 *Rukovodstvo po proektnomu menedzhmentu* [Project Management Guide]. M., Standartinform, 2014. 50 p.
9. GOST R ISO 10006–2005 *Rukovodstvo po menedzhmentu kachestva pri proektirovanii* [Quality Management Guide for Project Management]. M., Standartinform, 2005. 28 p.
10. ISO 1006:2017 Quality Management Systems: Guidelines for Quality Management in Projects. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10006:ed-3:v1:en>, (Accessed: June 1, 2019).
11. GOST R ISO 31000–2010 *Menedzhment riska. Principy i rukovodstvo* [Risk management. Principles and guidelines]. M., Standartinform, 2010. 20 p.
12. ISO 31000:2009 Risk management – Principles and guidelines. Available at: <https://www.iso.org/ru/standard/43170.html> (Accessed: June 9, 2019).
13. Silov V.B. *Prinyatie strategicheskikh reshenij v nechetkoj obstanovke* [Making strategic decisions in a fuzzy setting]. Moscow, INPRO-RES, 1995, 228 p.
14. Maksimov V.I., Kornoushenko V.I., Kachaev S.V. Cognitive technologies for making management decisions. Available at: <http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/bpa/092aa276c601a997c32568c0003ab839> (Accessed: May 20, 2019).
15. Pyl'kin A.N., Kroshilin A.V., Kroshilina S.V. Methodology of cognitive analysis in the automation of materials management. *Computer science and control systems*, 2012, no. 2 (32), pp. 138–149 (in Russ).
16. Maksimov V.I., Kachaev S.V., Kornoushenko E.K. Analysis and control in an unstable environment. *Banking technology*, 1999, no. 3. pp. 47–52 (in Russ).
17. Chen Z., Lan Y., Zhao R. Impacts of risk attitude and outside option on compensation contracts under different information structures. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2018, vol. 17, iss. 1, pp. 13–47.
18. De Maio C., Fenza G., Loia V., Orciuoli F. Linguistic fuzzy consensus model for collaborative development of fuzzy cognitive maps: a case study in software development risks. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2017, vol. 16, Iss. 4. pp. 463–479.
19. Zade L. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ee rol' v prinyatii priblizhennykh reshenij* [The concept of a linguistic variable and its role in making approximate decisions]. Moscow, Mir, 1976, 168 p.
20. Blyumin S.L., Shujkova I.A., Saraev P.V., Cherpakov I.V. *Nechetkaya logika: algebraicheskie osnovy i prilozheniya. Monografiya* [Fuzzy logic: algebraic foundations and applications. Monograph.]. Lipeck, LEGI, 2002. 113 p.
21. Baraksanov D.N. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie podderzhki prinyatiya reshenij pri prodvi-zhenii programmogo produkta na korporativnyy rynek: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Mathematical and software solutions solutions in the promotion of a software product on the corporate market. Cand. Diss]. Tomsk, 2016. 186 p.
22. Ehlaikov Yu.P., Baraksanov D.N. Mathematical model and algorithm for selecting Internet sites and locations for communication messages when organizing an advertising campaign. *Business Informatics*, 2017, no. 1, ph. 55–60 (in Russ.).

Yury P. Yehlaikov

Doctor of Engineering, Assistant Professor,
Department Automation of Information Processing (AOI)
Tomsk State University of Control Systems
and Radio Electronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-41-31
Email: upe@tusur.ru

Natalia V. Permyakova

PhD student,
Department of AOI TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-47-01
Email: pnv@muma.tusur.ru

УДК 338.49 /65.012.122

А.Н. Алимханова, А.А. Мицель

Оценка эффективности предприятий на основе метода DEA

Рассматривается вопрос о применении выход-ориентированной модели Data Envelopment Analysis (DEA) как способа оценки эффективности деятельности предприятий с использованием финансовых показателей, которые описывают финансово-хозяйственную деятельность предприятий. Для применимости модели была выполнена её модификация так, чтобы связь между входными и выходными финансовыми показателями в модели была прямо пропорциональной, как это имеет место в классической модели DEA. Приводятся результаты моделирования на основе данных из открытых источников за период 2013–2016 гг. предприятий по распределению газообразного топлива. Для анализа были отобраны успешные предприятия и предприятия-банкроты. Результаты расчетов показали, что модель DEA может использоваться для оценки риска банкротства предприятий.

Ключевые слова: оценка эффективности, DEA-анализ, модели банкротства, финансовые показатели, банкротство, эффективность.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-104-108

Проблема оценки эффективности функционирования предприятий является одной из основных, которая стоит перед собственниками и управляющими лицами.

Одним из способов анализа эффективности предприятия является метод Data Envelopment Analysis (DEA). Это непараметрический метод оценивания группы действующих объектов, позволяющий выявить эффективные и неэффективные группы предприятий.

Обзор литературы

Существует большое количество исследовательских работ по использованию метода DEA в различных сферах деятельности: экономической, социальной и др.

М. Фаррелл впервые предпринял попытку измерить эффективность одной единицы конечной продукции с одним входным и одним выходным параметром [1]. Его идея состояла в том, чтобы объединить все различные входные и выходные параметры. Он применил данную модель в такой отрасли, как сельское хозяйство США. Его идею в дальнейшем развили американские ученые А. Чарнез, У. Купер, Е. Родес [2], которые создали первую DEA-модель.

Для диагностики финансового состояния в работе Т.А. Рукавициной и В.В. Смолина [3] рассматривается аптечная сеть из 36 филиалов. Каждый филиал аптечной сети оценивается по трем входам и одному выходу, по трем входам и трем выходам. Авторы в качестве входных параметров анализируют коммерческие расходы, численность сотрудников, общую площадь филиала, а в качестве выходных параметров рассматривается выручка от реализации, выручка реализации, разбитая по сегментам рынка [3]. Они отмечают, что довольно часто возникают задачи по анализу функционирования целого ряда организаций, характеристики которых не поддаются комплексному одностороннему измерению. Поэтому основная цель работы [3] – добиться повышения эффективности функционирования одной структуры однотипных торговых предприятий – сети аптек.

Другие авторы [4] рассматривают вопрос о возможности применения метода DEA для оценки эффективности деятельности предприятий в социальной сфере ЖКХ. Результатом их работы является группа «кластеров», которая содержит объекты, однородные не в смысле расстояния в пространстве показателей, как в кластерном анализе, а однородные в смысле эффективности. Еще одним отличием от кластерного анализа является то, что полученные «кластеры» будут упорядочены по степени эффективности [4].

Анализируя работы [1–9], можно выделить, что метод позволяет вычислить один агрегированный показатель эффективности для каждого объекта без использования весовых коэффициентов для переменных, используемых в анализе, а также возможность оценить эффективность предприятия с учетом множества видов ресурсов и выпускаемой продукции. Во всех рассмотренных и известных нам работах метод DEA применяют к экономическим объектам, которые описываются производственной функцией. Входными данными являются объемы затраченных ресурсов, выходными данными – объемы выпускаемой или реализованной продукции. Поэтому связь между выходными и входными данными всегда прямо пропорциональная.

В данной работе экономический объект описывается не объемами затраченных ресурсов и выпускаемой продукции, а финансовыми показателями. В качестве исследуемых объектов рассматриваются российские предприятия по распределению газообразного топлива.

Общая характеристика метода DEA

DEA основан на построении границы эффективности, которая и является аналогом производственной функции, когда выпуск является не скалярным, а векторным, т.е. когда выпускается несколько видов продукции.

Существует две модели метода DEA: модель, ориентированная на вход и модель, ориентированная на выход.

В работах [6–11] подробно рассматривается модель, ориентированная на вход. В данном исследовании рассматривается модель, ориентированная на выход.

В модели, ориентированной на выход, результатом будет являться выдача рекомендаций по увеличению значений вектора выходов $y^{(j)}$ без увеличения значений вектора $x^{(j)}$ (j – номер экономического объекта). Здесь выходные переменные рассчитываются по формуле

$$y_{\text{рекомен}}^{(j)} = v \cdot y^{(j)}, \quad (1)$$

где v – показатель эффективности j -го объекта, $y^{(j)}$ – вектор значений выходных переменных для j -го объекта.

Модель, ориентированная на выход, имеет вид

$$\begin{aligned} f(v, L) &= v + L \cdot 0 \rightarrow \max, \\ -v \cdot y^{(i)} + Y \cdot L &\geq 0, \\ x^{(i)} - X \cdot L &\geq 0, \\ L_i &\geq 0, \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (2)$$

В качестве меры эффективности финансово-хозяйственной деятельности предприятия можно рекомендовать величину

$$T_{\text{out}} = \exp(-(v-1)). \quad (3)$$

В этом случае для предприятий, работающих на границе эффективности ($v = 1$), величина $T_{\text{out}} = 1$, а для неэффективных предприятий ($v > 1$) величина $T_{\text{out}} < 1$.

В DEA-модели входы и выходы могут измеряться в различных шкалах, что позволяет оценивать эффективность с разным набором ресурсов, а также позволяет ранжировать объекты по уровням эффективности. Результаты расчетов позволяют определить неэффективные предприятия и дать рекомендации по повышению их эффективности. Всё перечисленное выше является особенностями данного метода.

В отличие от других работ [2–5], [12–14] в данном исследовании мы не используем принцип «затраты–выпуск». В качестве входных и выходных параметров используются не объемы затраченных ресурсов и выпускаемой продукции, а финансовые показатели, которые характеризуют финансово-хозяйственную деятельность предприятия в целом. Для этой цели предварительно проводится исследование корреляционных связей между входными и выходными финансовыми показателями. Для успешного применения метода DEA потребовалась модификация исходных данных. Входные данные были перегруппированы на две группы. В первой группе статистическая связь между входами и выходами является прямо пропорциональной, для второй – обратно пропорциональной. Чтобы выполнялись правила существования прямо пропорциональной зависимости между входами и выходами, входные показатели второй группы определяются следующим образом (4):

$$X2_{ij} = \frac{1}{X1_{ij}}, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где $X1$ и $X2$ – матрицы финансовых показателей 1-й и 2-й групп соответственно, i – количество предприятий, j – количество показателей [15].

Результаты исследования эффективности предприятий по распределению газообразного топлива

В качестве входных и выходных параметров рассматриваются финансовые показатели. Для оценки финансово-хозяйственной деятельности предприятия часто используют систему показателей:

- оценка ликвидности;
- оценка рентабельности;
- оценка финансовой устойчивости;
- оценка деловой активности.

В каждой группе насчитывается от 6 до 12 различных коэффициентов. Для исследования не включались 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. Все финансовые коэффициенты тесно связаны друг с другом. При их анализе важно обнаружить эти связи и показать, как различные количественные характеристики деятельности предприятия связаны с общими результатами деятельности предприятия. При отборе показателей использовался факторный анализ (ФА), который позволил сократить число анализируемых показателей с 32 до 14.

Для проведения исследования используем информационно-эмпирическую базу, которой послужат данные из 1-й и 2-й форм обязательной финансовой отчетности. Данные были собраны из открытых источников, таких как СПАРК-Интерфакс и СКРИН. Проиллюстрируем модель DEA для 10 входных и 4 выходных параметров. В качестве входных и выходных параметров рассматриваются финансовые показатели, которые описывают финансово-хозяйственную деятельность предприятия.

Входные параметры:

- 1) коэффициент капитализации;
- 2) коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами;
- 3) коэффициент платежеспособности;
- 4) коэффициент при мобилизации средств;
- 5) рентабельность совокупного капитала;
- 6) рентабельность внеоборотного капитала;
- 7) рентабельность перманентного капитала;
- 8) оборачиваемость заемного капитала;
- 9) оборачиваемость кредиторской задолженности;
- 10) оборачиваемость дебиторской задолженности).

Выходные параметры:

- 1) коэффициент финансовой устойчивости;
- 2) коэффициент текущей ликвидности;
- 3) рентабельность продаж;
- 4) оборачиваемость оборотного капитала.

В табл. 1 для примера представлены результаты расчетов коэффициентов корреляции между показателями финансовой деятельности четвертого предприятия.

Таблица 1
Данные корреляции между показателями финансовой деятельности

Входные параметры	Выходные параметры			
	1	2	3	4
1	0,974	0,845	0,887	0,843
2	-0,998	-0,832	-0,927	-0,820
3	0,995	0,865	0,900	0,852
4	0,482	0,097	0,642	0,059
5	0,852	0,580	0,889	0,586
6	0,975	0,703	0,982	0,686
7	0,945	0,617	0,992	0,602
8	0,979	0,903	0,853	0,900
9	0,986	0,894	0,868	0,891
10	-0,614	-0,795	-0,393	-0,814

Анализ коэффициентов корреляции между финансовыми показателями позволил выявить как прямую, так и обратную корреляционную зависимость между отдельными коэффициентами. Это потребовало модифицировать классическую модель DEA. Полужирным шрифтом выделены значения

показателей, которые имеют отрицательную корреляцию между входными и выходными параметрами.

В исследовании использовалась модель, ориентированная на выход (3), т.е. на максимизацию параметра эффективности v . Количество входных параметров $m = 10$, количество выходных параметров $k = 4$, число анализируемых предприятий $n = 8$.

В табл. 2 приведены результаты расчетов эффективности для 8 предприятий, из которых 6 действующих и 2 обанкротившихся, за период с 2013 по 2016 г.

Таблица 2
Результаты расчетов за период с 2013 по 2016 г.

Номер предприятия	2013	2014	2015	2016
1	0,800	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	0,990	1	1
4	0,700	1	1	1
5	1	1	0,992	1
6	1	1	1	1
7	0,019	0,017	0,004	0,001
8	0,016	0,001	0	0

На рис. 1, 2 представлена динамика эффективности финансово-хозяйственной деятельности действующих и обанкротившихся предприятий соответственно за временной период с 2013 по 2016 г.

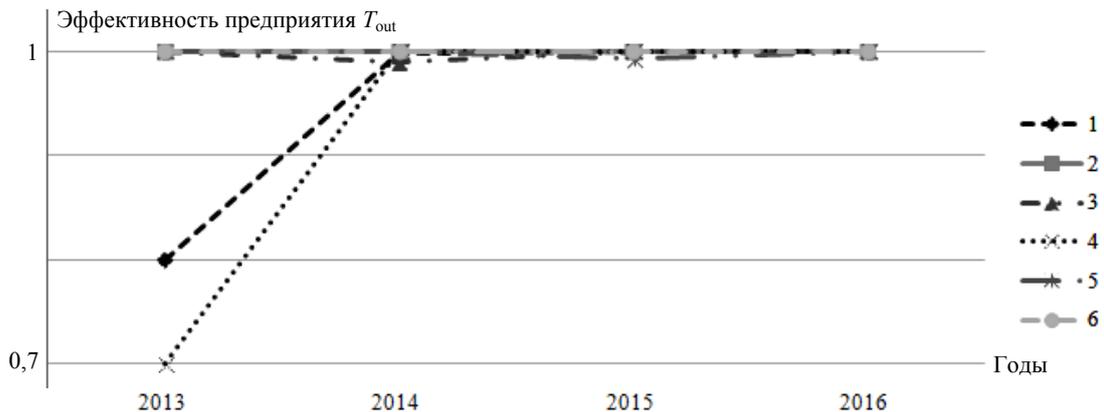


Рис. 1. Динамика эффективности финансово-хозяйственной деятельности действующих предприятий

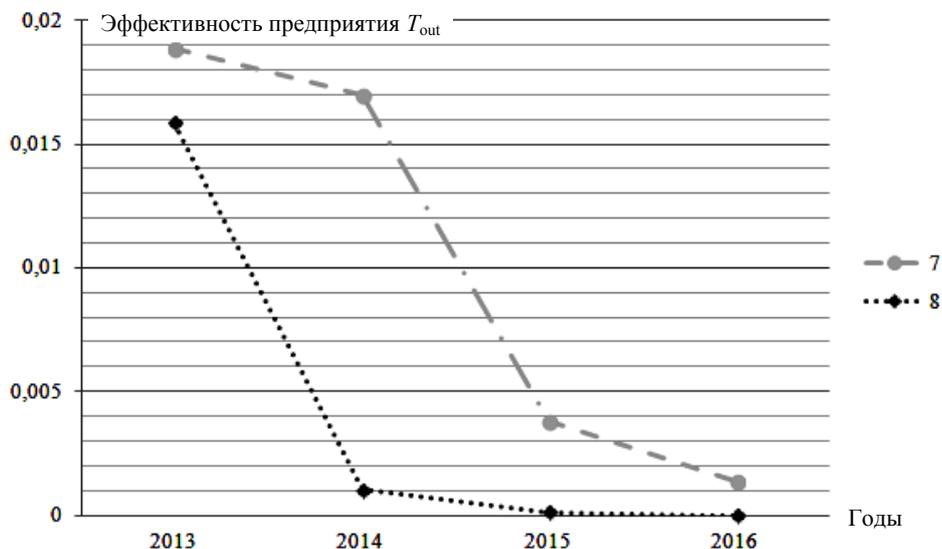


Рис. 2. Динамика эффективности финансово-хозяйственной деятельности обанкротившихся предприятий

Следует отметить, что наихудшие значения показывают предприятия 7 и 8. Эффективности этих предприятий существенно меньше 1. Кроме того, в динамике показатели этих двух предприятий убывают, что подтверждает их статус «банкроты». Что касается 1-го и 4-го предприятия, то в 2013 г. эффективность была ниже 1, однако в дальнейшем эффективность приблизилась к 1. Остальные предприятия имеют оценку эффективности, близкую или равную 1. В связи с этим на рис. 1 они лежат на одной прямой.

Заключение

Анализ полученных результатов показал, что классический метод DEA можно использовать для оценки эффективности экономических объектов, описываемых финансовыми показателями, а не объемами затрачиваемых ресурсов и выпусков. Для этого необходимо предварительно провести анализ корреляционных связей между входными и выходными показателями и при необходимости перегруппировать входные данные таким образом, чтобы зависимость между входами и выходами была прямо пропорциональной. Результаты, полученные в ходе данного исследования, позволяют говорить о возможности применения данного метода для проведения диагностики финансового состояния предприятий.

Такой метод может быть рекомендован и для других отраслей экономики, таких как строительство, торговля, сельское хозяйство, общественное питание и многие другие.

Литература

- Farrell M.J. The Measurement of Productive Efficiency // Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General). – 1957. – Vol. 120, No. 3, pt. III. – P. 253–281.
- Charnes A. Measuring the Efficiency of Decision Making Units / A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes // European Journal of Operational Research. – Amsterdam: North-Holland, 1978. – Vol. 2. – P. 429–444.
- Рукавицына Т.А., Смолин В.В. Реализация метода DEA для диагностики финансового состояния предприятий // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2008. – Т. 20, № 3. – С. 171–175.
- Система анализа эффективности деятельности предприятий социальной сферы / Е.Р. Хасанов, П.В. Зеленков, К.К. Бахмарева, О.О. Смирнов // Путь науки. – 2015. – Т. 11, № 1. – С. 48–49.
- Сравнительное исследование эффективности в инновации на примере электроэнергетических компаний группы «Газпром» / Ю.А. Назарова, С.Г. Костерин, А.Г. Костерин, В.Д. Долгушин // Вестник РУДН. Сер. «Экономика». – 2012. – № 2. – С. 89–97.
- Новожилов А.А., Рукавицына Т.А. Применение метода DEA и его модификации для анализа организационно-технических систем // Вестник НИИ СУВПТ. – 2008. – № 26. – С. 137–145.
- Рукавицына Т.А. Развитие модели методологии DEA // Вестник СибГАУ. – 2010. – Т. 24, № 3. – С. 74–77.
- Кочуров Е.В. Оценка эффективности деятельности лечено-профилактических учреждений: сравнительный анализ методов и моделей // Вестник СПбГУ. – 2002. № 3. – С. 110–128.
- Новожилов А.А. Использование метода DEA для анализа эффективности перерабатывающей отрасли // Современные наукоемкие технологии. – 2009. – № 2. – С. 43–44.
- Новожилов А.А. Метод DEA для функционирования предприятий по переработке твердых отходов // Информатика и системы управления. – 2010. – Т. 23, №1. – С. 98–103.
- Карасева М.В., Новожилов А.А., Рукавицына Т.А. К вопросу оценки эффективности функционирования организационно-технических систем // Математика, механика, информатика. – 2011. – № 4. – С. 40–42.
- Кривоножко Е.В., Пропой А.И., Сеньков Р.В., Родченков И.В., Анохин П.М. Анализ эффективности функционирования сложных систем // Автоматизация проектирования. – 1999. – № 1. – С. 2–7.
- Новожилов А.А. Использование метода DEA для анализа эффективности перерабатывающей отрасли // Современные наукоемкие технологии. – 2009. – № 2. – С. 43–44.
- Ковалев И.В., Новожилов А.А., Рукавицына Т.А. Анализ эффективности организационно-технологических комплексов предприятий // Системы управления и информационные технологии. – 2010. – Т. 42, № 4. – С. 36–39.
- Важдаев А.Н., Мицель А.А. DEA-анализ эффективности отраслей экономики моногорода // Региональная экономика: Теория и практика. – 2017. – Т. 15, № 12. – С. 2378–2390.

Алимханова Алия Нуржановна

Аспирант каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID 0000-0003-0964-1659
Тел.: +7-961-887-28-36
Эл. почта: aliya0alimkhanova@gmail.com

Мицель Артур Александрович

Д-р техн. наук, профессор каф. АСУ ТУСУРа профессор каф. информационного обеспечения инновационной деятельности Национального исследовательского Томского государственного ун-та (НИ ТГУ) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID (0000-0002-2624-4383)
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: maa@asu.tusur.ru

Alimkhanova A.N., Mitsel A.A.

Evaluation of enterprise performance based on the DEA method

The article discusses the application of the Data Envelopment Analysis method as a way of assessing the performance of enterprises using financial indicators that describe the financial and economic activities of enterprises. Efficiency is one of the most important qualities, which is especially important for the analysis of enterprises in various fields of activity.

Keywords: efficiency evaluation, DEA analysis, financial indicators, bankruptcy, efficiency.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-104-108

References

1. Farrell, M.J. The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of The Royal Statistical Society, Series A (General)*, 1957, vol. 120, no 3, pt. 3, pp. 253–281.
2. Charnes, A. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*, 1978, vol. 2, pp. 429–444.
3. Rukavitsyna T.A., Smolin V.V. Implementation of the DEA method for diagnosing the financial condition of enterprises. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2008, vol. 20, no. 3, pp. 171–175 (in Russ.)
4. Hasanov E.R., Zelenkov P.V., Bahmareva K.K., Smirnov O.O. System for analyzing the performance of social enterprises. *Put nauki*, 2015, vol. 11, no. 1, pp. 48–49 (in Russ.)
5. Nazarova YU.A., Kosterin S.G., Kosterin A.G., Dolgushin V.D. Comparative study of efficiency in innovation by the example of the electric power companies of the Gazprom Group. *Vestnik RUDN. Seriya*, 2012, no. 2, pp. 89–97 (in Russ.)
6. Novozhilov A.A., Rukavitsyna T.A. The application of the DEA method and its modification for the analysis of organizational and technical systems. *Vestnik NII SUVPT*, 2008, no. 26, pp. 137–145 (in Russ.)
7. Rukavitsyna T.A. Development of the DEA methodology model]. *Vestnik SibGAU*, 2010, vol. 24, no. 3, pp. 74–77 (in Russ.)
8. Kochurov E.V. Evaluation of the effectiveness of treatment and prevention institutions: comparative analysis of methods and models. *Vrstmik CpbGU*, 2002, no. 3, pp. 110–128. (In Russ.)
9. Novozhilov A.A. Using the DEA parameter to analyze the efficiency of the processing industry. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*, 2009, no. 2, pp. 43–44 (in Russ.)
10. Novozhilov A.A. DEA method for the operation of solid waste treatment plants. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2010, no. 1, pp. 98–103 (in Russ.)
11. Karaseva M.V., Novozhilov A.A., Rukavitsyna T.A. On the issue of evaluating the effectiveness of the functioning of organizational and technical systems. *Matematika, mekhanika, informatika*, 2011, no. 4, pp. 40–42 (in Russ.)
12. Krivonozhko E.V., Propoj A.I., Sen'kov R.V., Rodchenkov I.V., Mnohin P.M. Analysis of the performance of complex systems. *Avtomatizaciya proektirovaniya*, 1999, no. 1, pp. 2–7 (in Russ.)
13. Novozhilov A.A. Using the DEA method to analyze the efficiency of the processing industry. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*, 2009, no. 2, pp. 43–44 (in Russ.)
14. Kovalev I.V., Novozhilov A.A., Rukavitsyna T.A. Efficiency analysis of the technological-organizing complex of the enterprises. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*, 2010, vol. 42, no. 4, pp. 36–39 (in Russ.)
15. Vazhdaev A.N., Mitsel, A.A., EA-analysis of efficiency of branches of single-industry economy. *Regional'naya ehkonomika: Teoriya i praktika*, 2017, vol. 15, no. 12, pp. 2378–2390 (in Russ.).

Aliya N. Alimkhanova

PhD student, Department of Automated Control Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID 0000-0003-0964-1659
Phone: +7-961-887-28-36
Email: aliya0alimkhanova@gmail.com

Artur A. Mitsel

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Automated Control Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
Professor, Department of Information Support innovation activities
National Research Tomsk State University
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID 0000-0002-2624-4383
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: maa@asu.tusur.ru

УДК 007.61, 681.3.01

М.Ю. Катаев, Е.В. Рудова

Методика учета угла направления движения человека при изучении параметров походки по видеопоследовательности

Распознавание движений человека на основе методов технического зрения привлекло многих исследователей к этой теме ввиду задач, требующих решения в медицине, спорте, охране, что привело к появлению множества программно-аппаратных приложений. Эти приложения варьируются от простого распознавания жестов до понимания сложного поведения человека в системах наблюдения. Это приводит к серьезному развитию методов, связанных с представлением и распознаванием движений человека. Однако при практическом использовании этих приложений возникают неточности извлечения информации, связанные с изменением направления движения человека относительно оси визирования камеры. В статье рассматривается подход, позволяющий строить приложения по распознаванию движений человека с учетом различных направлений его движения относительно камеры.

Ключевые слова: изображение, походка человека, анализ походки, пространственно-временные параметры, направление движения.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-109-113

Походка является важной биометрической характеристикой, выделяющей человека на фоне других и позволяющей использовать их для решения задач идентификации, лечения и др. В современных системах видеонаблюдения видео постоянно просматривается оператором (человеком), в медицине врач осматривает непосредственно человека или может просмотреть видео, то же самое происходит в спорте и других приложениях. Очень высокий человеческий фактор принятия решения, высокая вероятность пропуска важных событий, утомляемость и др. С увеличением количества видео и контролируемых событий, операторы не могут контролировать на высоком уровне содержимое видео. Таким образом, существует потребность в интеллектуальных системах наблюдения, которые могут анализировать события в режиме реального времени (или постобработки) и выявлять соответствующую информацию, используя для анализа движение человека. Такие интеллектуальные системы иногда называют «умными системами видения» (smart vision).

Приведем несколько приложений для таких интеллектуальных систем наблюдения за движением человека. Современная тенденция развития жилищного строительства ведет, в рамках концепции умного дома, к привлечению компьютера для наблюдения за состоянием квартиры, в том числе и охраны. Важным направлением является тема изучения поведенческой биометрии, где изучаются и анализируются жесты и позы. Приложение этого направления связано с развитием игровой индустрии, удаленного управления устройствами и др. Развитие робототехники также связано с анализом движений человека, при построении систем управления гуманоидными роботами, способными имитировать движения человека. Медицина уже давно, со времен Гиппократов, использует системы наблюдения за человеком как методику оценки его состояния. Распознавание движений человека позволяет изучать

функции опорно-двигательного аппарата и отклонения от нормы. Важное направление о применении интеллектуальных систем видения для помощи пожилым и людям с физическими и умственными недостатками. В спорте распознавание движения полезно для анализа движений спортсмена и разработки соответствующих методик для обучения. Возможны применения методов распознавания движений человека для анализа, обучения и понимания танцевальных движений, актерского мастерства и др.

Анализ литературы [1–9] показал пригодность использования цифровых камер для решения задач безопасности, распознавания походки в медицине, спорте и др. Однако надежность таких систем пока еще не очень высокая вне стен, специально подготовленных для измерений помещений, за счет множества факторов, которые необходимо учитывать. Ранее выполненные нами работы [10–12] также показали, что использование видео данных является надежным способом извлечения информации о параметрах движения человека.

Походка человека на изображении

Обычный полный цикл ходьбы человека для одной ноги состоит из начального контакта стопы с землей, положения стойки до стадии двойной поддержки, а затем мах ноги вперед, чтобы сделать движение для следующего шага. Считается, что у большинства людей должна быть симметричная походка, т.е. действия, выполняемые двумя ногами, должны быть практически идентичны и смещены на половину цикла по фазе друг от друга [13–15]. Будем считать, что методика извлечения особенностей походки идущего человека возможна только при перпендикулярном направлении ходьбы к оптической оси камеры. Лучше всего, когда сцена является простой: фон и идущий человек, что существенно упрощает задачу обнаружения на переднем плане идущей фигуры человека. Для получения видео используется простая цифровая камера. Видео должно

получаться с известным фиксированным временным интервалом, таким чтобы информация о походке человека могла быть восстановлена. Так, например, средний шаг человека составляет 0,75 м, и в секунду он делает два шага, тогда при частоте съемки 30 кадров в секунду, на каждый шаг будет сделано 15 кадров, что достаточно, чтобы оценить основные фазы движения. Естественно, более точное определение параметров движения требует более высокой частоты повторения кадров.

Постановка проблемы

Обнаружение человека на изображении – это быстро развивающаяся область компьютерного зрения с множественным применением в различных приложениях. Поиск человека в изображениях является ключевой особенностью для реализации приложений и сложной задачей с точки зрения машинного зрения. Использование цифровой камеры позволяет эффективно обнаружить человека на изображении в процессе движения. Однако есть несколько проблем, которые усложняют процесс обнаружения:

1. Одиночная цифровая камера затрудняет обнаружение удаленных от нее объектов.

2. Движение человека относительно камеры (динамическая сцена) затрудняет анализ движения, поскольку при использовании метода вычитания фона возникает много артефактов на разностном изображении, которые необходимо удалять.

3. Сложный фон усложняют проблему обнаружения человека на изображении.

4. Различное освещение от кадра к кадру также усложняет выделение человека на изображении за счет появления теней, высококонтрастных частей изображения и др.

5. Движение человека под разными углами относительно оси визирования камеры (изменение размера фигуры) [14].

В данной работе нами рассматриваются особенности определения движения человека и учет направления его движения для коррекции параметров походки (длина шага, симметрия и др.). Считаем, что на изображении находится человек, а вся остальная область – фон. При обработке изображений нами считается, что фон недоступен для оценки и может измениться во время измерений. Если фон является статичным, тогда разность кадров с хорошей вероятностью, от кадра к кадру, будет компенсировать его влияние, оставляя на изображении только фигуру человека.

Обнаружение движения человека на изображении

Целью обнаружения походки является определение параметров движения человека независимо от сцены, помех фона и одежды. Анализ движения включает в себя обнаружение и распознавание объектов, отслеживание и понимание поведения. В любом смысле ходьба человека связана с движением сотен мышц и суставов, однако видимая на изображении ситуация определяется циклическим измене-

нием положения фигуры человека в пространстве. Изображения, полученные с цифровой камеры, имеют разного рода шумы, что требует применения предварительной обработки (для уменьшения влияния шумов) [8, 9]. Целью этих методов является подготовка изображений в таком виде, чтобы уменьшить будущие нагрузки на обработку и подойти близко к разработке приложений реального времени. Предварительная обработка также имеет большое значение для последующего извлечения информации, содержащейся на изображении (в нашем случае это фигура человека) [6, 12, 15].

Методы обнаружения движения можно разделить на следующие категории: 1) согласование с шаблоном, 2) оптический поток, 3) дифференцирование по времени и 4) вычитание фона. Методы согласования с шаблоном сложно использовать на практике, так как они требуют специальных условий получения изображений, потому что человеческое тело не является жестким. Методы оптического потока имеют высокую вычислительную сложность в сложных сценах и выделяют все объекты с малейшим движением, что заставляет проводить процедуры выделения именно фигуры человека из множества артефактов. Методы дифференциации часто оставляют «дыры» в зоне движения (фигура человека разрывается), что вынуждает применять методы морфологического анализа для восполнения пропущенных пикселей фигуры человека. Поэтому отметим, что трудно получить точные контуры движущихся объектов на изображении без применения набора тех или иных методов обработки изображений [12, 13]. Методы вычитания фона быстрые и могут обеспечить информацией об области движения, однако оставляют также множество случайно расположенных на изображении артефактов. Учитывая вышеописанные методы, разрабатываемая нами программная система использует два подхода выделения фигуры человека на изображении – это дифференцирование по времени и вычитание фона.

В итоге после удаления фона, очистки от артефактов получают изображения движения человека, которые приведены на рис. 1.



Рис. 1. Изображения движения человека, полученные после предварительной обработки

Из рис. 1 видно, что после предварительной обработки изображений остаются артефакты, которые искажают фигуру человека, а также тени в районе ног. Эти артефакты удаляются методом морфологической коррекции изображений с применением алгоритмов закрытия и открытия.

Расчет направления ходьбы

В работе нами применяется геометрический метод для получения углов направления ходьбы. Пред-

полагается, что положение камеры фиксировано, а правая сторона фона является координатой в центре 0. Предположим, объект входит в сцену справа, идет налево под некоторым углом, а затем возвращается к начальной точке. Мы выбираем координаты, как показано на рис. 2, где β – угол направления ходьбы, $H = (OO')$ – расстояние между фоном и камерой; H_1 – расстояние $(O'D)$, отрезок (OD) – расстояние, пройденное человеком, h, h_1 – изменение высоты фигуры человека при перемещении из точки O в точку D , α – угол поля зрения цифровой камеры, отрезок (OA) – проекция на горизонтальную ось отрезка (OD) .

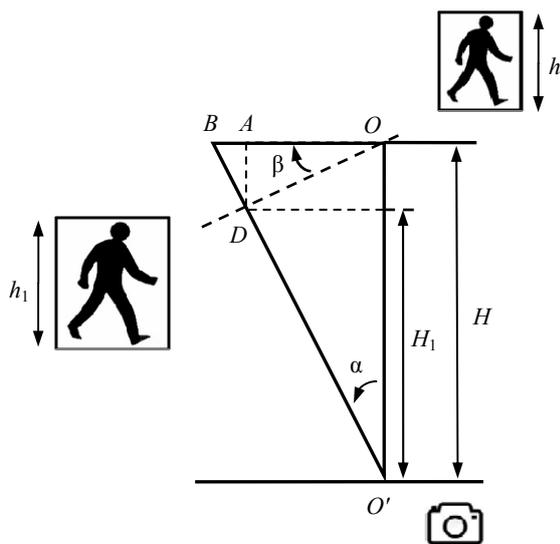


Рис. 2. Расчет угла направления движения человека относительно оси визирования цифровой камеры

На рис. 2 приведена схема движения человека (OB при перпендикулярном направлении) или (OA под углом β) относительно оси визирования цифровой камеры (OO'). При этом фигура человека изменяется в размерах от h до h_1 . Зная расстояние от цифровой камеры до начальной точки движения человека (H) и конечной точки (H_1), появляется возможность оценить отклонение человека от перпендикулярного направления. Можно получить подобие

размеров $H * h = H_1 * h_1$, а также $(OA) * H_1 = (OB) * H$. Из геометрии движения можно вычислить угол отклонения β по формуле

$$\tan \beta = \frac{H - H_1}{(OA)} = h_1 * \frac{1 - \frac{h}{h_1}}{\tan \alpha * h} \tag{1}$$

Таким образом, измеряя размер фигуры человека в начале и в конце движения, а также зная половину угла поля зрения, можно оценить угол направления движения человека.

Так как человек перед камерой ходит от одной стороны сцены до другой (справа налево и потом в обратную сторону), важно фиксировать направление, в котором движется человек [5]. Для этого нами применяется простой подход (рис. 3).

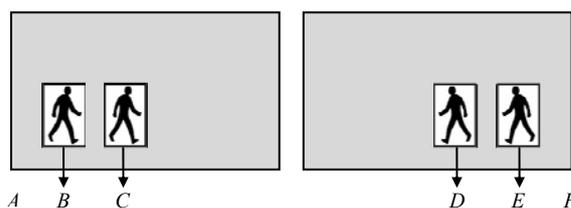


Рис. 3. К алгоритму вычисления направления движения человека на изображении

Построение алгоритма вычисления направления движения человека на изображении строится таким образом, что каждый раз вычисляется центр блока, в который помещена фигура человека (см. точки центров E, D при движении справа налево и C, B при движении слева направо). Тогда, вычисляя разности между первыми положениями точек $(AB / AF \text{ и } AC / AF) < 0,5$ и $(AE / AF \text{ и } AD / AF) > 0,5$, появляется возможность однозначно отделить направление движения и, кроме того, $(AC - AB) > 0$ и $(AD - AE) < 0$. Конечно же, здесь мы считаем, что человек не поворачивает на середине пути и проходит весь маршрут полностью.

Направление ходьбы может существенно изменить вид кривой изменений центра тяжести, как это показано на рис. 4, а.

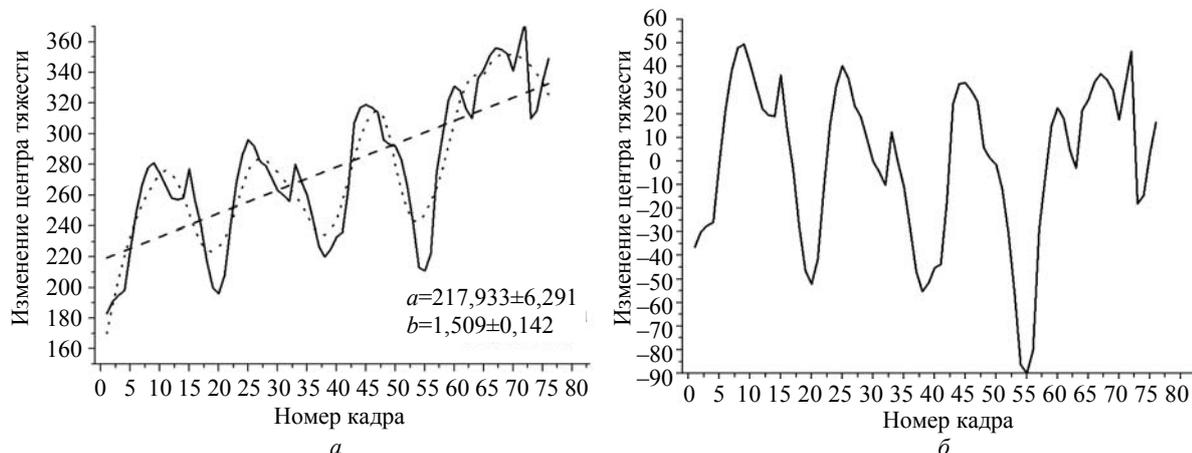


Рис. 4. Применение метода линейной регрессии к компенсации направления движения человека

Применение метода линейной регрессии $y(x) = a + b \cdot x$ позволяет найти кривую, относительно которой можно выполнить выравнивание и получить кривую изменения центра тяжести в процессе движения (см. рис. 4, б). Полученная на рис. 4, б кривая соответствует движению человека перпендикулярно направлению визирования цифровой камеры (прямая OO' на рис. 2). Полученная после выравнивания кривая является основой для поиска параметров походки человека: длина правого и левого шага, двойной шаг, амплитуда шага и др.

Заключение

В работе рассматривается задача оценки угла направления движения человека относительно оси визирования цифровой камеры, направления движения (справа налево или наоборот), а также компенсация направления движения человека в задаче оценки параметров походки. Представлены расчетные формулы, позволяющие легко учитывать изменение угла направления в задачах контроля движения человека. Использование результатов статьи возможно в приложениях, связанных со спортом, медициной, игровой индустрией, охраной и др.

Литература

1. Towards optimized placement of cameras for gait pattern recognition / R. Raman, P.K. Sa, S. Bakshi, B. Majhi // *Procedia Technol.* – 2012. – Vol. 6. – P. 1019–1025.
2. Yilmaz A. Object tracking: a survey / A. Yilmaz, O. Javed, M. Shah // *ACM Comput. Surv.* – 2006. – Vol. 3, No. 4. – P. 36–45.
3. Antonini G. Discrete choice models of pedestrian walking behavior / G. Antonini, M. Bierlaire, M. Weber // *Transp. Res. B, Methodol.* – 2006. – Vol. 40, No. 8. – P. 667–687.
4. Development of night-vision system / T. Tsuji, H. Hattori, M. Watanabe, N. Nagaoka // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* – 2002. – Vol. 3, No. 3. – P. 203–209.
5. Video based estimation of pedestrian walking direction for pedestrian protection system / G. Zhao, M. Takafumi, K. Shoji, M. Kenji // *J. Electron.* – 2012. – Vol. 29, No. 1-2. – P. 72–81.
6. Accurate estimation of human body orientation from RGB-D sensors / W. Liu, Y. Zhang, S. Tang, J. Tang, R. Hong, J. Li // *IEEE Trans. Cybern.* – 2013. – Vol. 43, No. 5. – P. 1442–1452.
7. Pierard S. Estimation of human orientation based on silhouettes and machine learning principles / S. Pierard, M. Van Droogenbroeck // *Proc. Int. Conf. Pattern Recognit. Appl. Methods (ICPRAM)*. – 2012. – P. 51–60.
8. Darrell T. Integrated person tracking using stereo, color, and pattern detection / T. Darrell // *International Journal of Computer Vision*. – 2000. – Vol. 37, No. 2. – P. 175–185.
9. Barron J. Performance of optical flow techniques / J. Barron, D. Fleet, S. Beauchemin // *International Journal of Computer Vision*. – 1994. – Vol. 12, No. 1. – P. 42–77.
10. Катаев М.Ю. Исследование двигательной активности человека на основе анализа видеоизображений. Аппаратно-программный комплекс / М.Ю. Катаев, Я.А. Хамаганов // *Доклады ТУСУР*. – 2010. – № 1 (21), ч. 2. – С. 177–182.
11. Определение и анализ двигательной активности постинсультного пациента из потока изображений / М.Ю. Катаев, С.Г. Катаев, Н.Г. Катаева, В.А. Чистякова // *Информатика и системы управления. Медицинская информатика*. – 2012. – № 4(34). – С. 43–50.
12. Абрамов М.О. Влияние методов преобработки на восстановление фигуры движущегося человека из потока изображений / М.О. Абрамов, М.Ю. Катаев // *Доклады ТУСУР*. – 2014. – № 4(34). – С. 114–119.
13. Cross-view and multi-view gait recognitions based on view transformation model using multi-layer perceptron / W. Kusakunniran, Q. Wu, J. Zhang, H. Li // *Pattern Recognition Letters*. – 2012. – Vol. 33, No. 7. – P. 882–889.
14. Iwashita Y. Identification of people walking along curved trajectories / Y. Iwashita, K. Ogawara, R. Kurazume // *Pattern Recognition Letters*. – 2014. – Vol. 48. – P. 60–69.
15. Haritaoglu I. A realtime system for detecting and tracking 61 people / I. Haritaoglu, D. Harwood, L. Davis // *Proc IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*. – 2000. – P. 222–227.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор
каф. автоматизированных систем управления (АСУ),
науч. рук. Центра космического мониторинга Земли
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: 8-960-975-27-85, +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: kataev.m@sibmail.com

Рудова Елизавета Витальевна

Магистрант каф. АСУ ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: 8-952-891-01-22, +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: issa4ka@mail.ru

Kataev M.Yu., Rudova E.V.

Calculating the angle of human movement direction by studying the parameters of a gait using video sequences

The process of identifying human movements using technical vision methods attracts many researchers to this topic, as it could be applied in medicine, sports, and protection; consequently it initiated the appearance of many software and hardware applications. These applications range from simple gesture recognition to a complex understanding of human behavior in surveillance systems. This leads to a serious development of methods related to the representation and recognition of human movements. However, in the practical use of these applications, there are inaccuracies in the extraction of information associated with a change in the direction of movement of a person relative to the axis of sight of the camera. The article discusses an approach that allows building applications for the recognition of human movements, taking into account the different directions of its movement relative to the camera.

Keywords: image, gait of a person, gait analysis, space-time parameters, direction of movement.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-109-113

References

1. Raman R., Sa P.K., Bakshi S., Majhi B. Towards optimized placement of cameras for gait pattern recognition. *Procedia Technology*, 2012, vol. 6, pp. 1019–1025.

2. Yilmaz A., Javed O., Shah M. Object tracking: A survey. *ACM Computing Surveys*, 2006, vol. 3, no. 4, pp. 36–45.
3. Antonini G., Bierlaire M., Weber M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B Methodological*, 2006, vol. 40, no. 8, pp. 667–687.
4. Tsuji T., Hattori H., Watanabe M., Nagaoka N. Development of night-vision system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, vol. 3, no. 3, pp. 203–209.
5. Zhao G., Takafumi M., Shoji K., Kenji M. Video based estimation of pedestrian walking direction for pedestrian protection system. *Journal of Electronics*, 2012, vol. 29, no. 1-2, pp. 72–81.
6. Liu W., Zhang Y., Tang S., Tang J., Hong R., Li J. Accurate estimation of human body orientation from RGB-D sensors. *IEEE Trans. Cybern.*, 2013, vol. 43, no. 5, pp. 1442–1452.
7. Pierard S., Van Droogenbroeck M. Estimation of human orientation based on silhouettes and machine learning principles. *Proc. Int. Conf. Pattern Recognit. Appl. Methods (ICPRAM)*, 2012, pp. 51–60.
8. Darrell T. Integrated person tracking using stereo, color, and pattern detection. *International Journal of Computer Vision*, 2000, vol. 37, no. 2, pp. 175–185.
9. Barron J., Fleet D., Beauchemin S. Performance of optical flow techniques. *International Journal of Computer Vision*, 1994, no. 12(1), pp. 42–77.
10. Kataev M.Yu., Khamaganov A.Ya. Human movement investigation with help of analysis of the video-images. Hardware-software complex. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, no. 1(21), pp. 177–182. (In Russ.).
11. Kataev M.Yu., Kataev S.G., Kataeva N.G., Chistyakova V.A. Determination of the common center and analysis of motor activity post-stroke patient from a stream of images. *Informatika i sistemy upravleniya. Meditsinskaya informatika*. [Informatics and control systems. Medical Informatics], 2012, no. 4(34), pp. 43–50. (In Russ.).
12. Abramov M.O., Kataev M.Y. The effect of preprocessing methods on figure of the moving human retrieving from an images sequence. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 4(34), pp. 114–119. (In Russ.).
13. Kusakunniran, W., Wu Q., Zhang J., Li H. Cross-view and multi-view gait recognitions based on view transformation model using multi-layer perceptron. *Pattern Recognition Letters*, 2012, vol. 33, no. 7, pp. 882–889.
14. Iwashita Y., Ogawara K., Kurazume R. Identification of people walking along curved trajectories. *Pattern Recognition Letters*, 2014, vol. 48, pp. 60–69.
15. Haritaoglu I., Harwood D., Davis L. A realtime system for detecting and tracking 61 people. *Proc IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, 2000, pp. 222–227.

Michael Yu. Kataev

Doctor of Engineering Sciences,
Department of Automated Control Systems,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-960-975-27-85, +7 (382-2) 70-15-36
Email: kataev.m@sibmail.com

Elizaveta V. Rudova

Undergraduate student,
Department of Automated Control Systems TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone.: 8-952-891-01-22, +7 (382-2) 70-15-36
Email: issa4ka@mail.ru

УДК 612.017.2

Н.Н. Несмелова

Прогностическая модель адаптации человека к информационной нагрузке

Рассматриваются подходы к изучению адаптации человека с помощью математического моделирования. Приводится описание модели для прогнозирования адаптации человека к информационной нагрузке. Основой модели стал комплекс индивидуально-типологических особенностей человека, связанных с характером ориентировочного рефлекса. Для создания модели использованы методы кластерного и дискриминантного анализов. В отличие от решений, предлагаемых другими авторами, данная модель позволяет диагностировать характерный для человека вариант реагирования на информационные воздействия окружающей среды. Показано, что ориентировочно-исследовательская реакция способствует успешной адаптации к информационной нагрузке, тогда как оборонительные варианты реагирования приводят к быстрому развитию дезадаптивных состояний. Модель реализована в виде компьютерной программы и апробирована в исследованиях адаптации студентов ТУСУРа к учебной деятельности.

Ключевые слова: человек, адаптация, информационная нагрузка, ориентировочный рефлекс, индивидуально-типологические особенности, кластерный анализ, дискриминантный анализ, прогностическая модель.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-114-118

Одна из важнейших проблем современной цивилизации связана с адаптацией людей к изменениям образа жизни и трудовой деятельности. Окружающая среда человека изменяется, особое значение приобретают её информационные компоненты [1–3]. Последствия информационного стресса проявляются нервно-психическими и другими заболеваниями [4], трудностями в обучении и социализации [5], а также ростом количества чрезвычайных происшествий в техносфере по причине недостаточной надежности человека-оператора технических систем [6]. Большое научно-практическое значение для образования, здравоохранения и безопасности жизнедеятельности в техносфере приобретает разработка способов оценки и прогнозирования успешности адаптации человека в информационной среде.

Согласно современным представлениям, человек является сложной, многокомпонентной динамической системой [7]. Оценка и прогнозирование его состояния в различных условиях требуют применения системного анализа, включающего методы прикладной статистики и математического моделирования [8]. Существуют разные подходы к математическому моделированию процессов адаптации, принимаются попытки разработки универсальных алгоритмов [9–12].

Ключевым моментом при создании математических моделей адаптации человека является выбор исходных характеристик. Как правило, для этого используются показатели функционального состояния [13]. Известно, что функциональное состояние зависит от индивидуально-типологических особенностей человека, которые также могут стать основой прогноза успешности адаптации [14]. Индивидуально-типологические особенности человека не меняются в процессе деятельности, что позволяет разрабатывать на их основе надежные прогностические модели. При этом особое внимание следует уделять

выбору индивидуальных особенностей, по которым предполагается осуществлять прогноз.

Алгоритм создания модели для прогноза успешности адаптации человека к различным видам деятельности включает следующие этапы:

- 1) выбор и обоснование индивидуально-типологических особенностей, подбор показателей и методик измерения, формирование выборки и получение исходных данных;

- 2) выявление однородных групп в многомерном пространстве индивидуальных показателей, их анализ и интерпретация;

- 3) наблюдение за испытуемыми в изучаемых условиях, при действии заданных факторов или при выполнении определенных видов деятельности, регистрация показателей функционального состояния и результатов деятельности, сравнение групп по показателям состояния и результатам деятельности;

- 4) создание классификаторов, их проверка на независимых выборках.

Целью данной работы стало создание модели для прогноза успешности адаптации человека к информационной нагрузке.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить комплекс индивидуально-типологических особенностей, связанных с успешностью адаптации человека к информационной нагрузке;

- 2) сформировать группы испытуемых, сходных по выбранным индивидуальным признакам;

- 3) изучить особенности адаптации к информационной нагрузке представителей каждой группы, сравнить группы по показателям функционального состояния и по результатам деятельности, выявить группу с высоким риском развития дезадаптации;

- 4) разработать прогностическую модель и проверить её эффективность на независимых выборках;

5) реализовать модель в виде компьютерной программы для прогноза успешности адаптации человека к информационной нагрузке.

Разработка модели для прогноза адаптации человека к информационной нагрузке

В качестве основы прогностической модели выбраны индивидуальные особенности человека, связанные с характером ориентировочного рефлекса (ОР), который можно рассматривать в качестве элементарной модели адаптации к информационной нагрузке. ОР возникает у человека и высших животных в ответ на появление любого нового стимула в виде ориентировочно-исследовательской реакции, способствующей улучшению восприятия, или оборонительной реакции, направленной на уменьшение воздействия, которое расценивается как вредное или опасное. Ориентировочно-исследовательская реакция включает два механизма: первый связан с активацией непроизвольного внимания и эмоциональной оценкой сигнала (эмоционально-ориентировочная реакция), второй базируется на когнитивных процессах и в большей степени вовлекает произвольное внимание (когнитивно-ориентировочная реакция). Оборонительная реакция может быть пассивной или активной [15].

Исследования механизмов адаптации [16] свидетельствуют, что первая стадия ответа на любое воздействие является неспецифической и включает все возможные механизмы реагирования. Ориентировочный рефлекс также включает все базовые реакции, однако их вклад может различаться в зависимости от индивидуально-типологических особенностей человека.

В работе [17] показано влияние особенностей нервной системы, темперамента, межполушарной асимметрии и вегетативной регуляции на характер ориентировочного рефлекса человека. Полученные результаты позволяют сформировать исходный набор показателей для создания прогностической модели: активированность центральной нервной системы, экстраверсия и нейротизм по тесту Айзенка, показатели мануальной и слуховой асимметрии, вегетативный индекс Кердо.

В качестве исходной выборки были взяты результаты исследования 109 студентов Томского государственного университета. Статистический анализ данных проводился с использованием лицензионной программы «Statistica, version 13». Для поиска однородных групп в многомерном пространстве индивидуально-типологических особенностей человека использован кластерный анализ. Сначала с помощью иерархического анализа по методу Варда с вычислением евклидовых расстояний между объектами было получено дерево, визуальный анализ которого позволил определить оптимальное количество кластеров. Окончательное решение из четырех кластеров получено методом к-средних. Сформированные группы значительно различались по всем индивидуальным показателям. По характеру вегетативных компонентов были определены типичные варианты

ориентировочного рефлекса для каждой группы: ориентировочно-исследовательские (эмоциональный и когнитивный) и оборонительные (активный и пассивный). Выделенные кластеры можно рассматривать как типы индивидуальности человека, каждому из которых соответствует определенная стратегия адаптации к информационной нагрузке.

Для изучения особенностей адаптации к информационной нагрузке испытуемым предлагалось выполнение модельной операторской деятельности, связанной с воспроизведением длительности звуковых сигналов. Известно, что точность восприятия времени связана с эффективностью познавательной деятельности человека, а также может служить индикатором уровня стресса [18], что позволяет использовать ошибку воспроизведения длительности как один из индикаторов функционального состояния испытуемых и в то же время как показатель качества выполнения заданий.

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что у представителей «оборонительных» типов, в отличие от «ориентировочно-исследовательских», при адаптации к информационной нагрузке развивается стресс и снижается уровень познавательной деятельности. При этом представители ориентировочно-когнитивного типа демонстрируют более высокий уровень познавательной деятельности по сравнению с представителями ориентировочно-эмоционального типа. Таким образом, для прогноза адаптации человека к информационной нагрузке необходимо определить его принадлежность к одному из типов индивидуальности, связанных с особенностями ориентировочного рефлекса.

Прогностическая модель реализована на основе дискриминантного анализа. Используемая в кластерном анализе выборка была случайным образом разделена на две: обучающую (59 человек) и контрольную (50 человек).

Классификационные функции, вычисленные на основе обучающей выборки, применялись для классификации контрольной. Точность классификации составила 98%. Построенный классификатор обладает высокой точностью, но его применение требует специального оборудования для определения активированности центральной нервной системы и коэффициента слуховой асимметрии. Исключение этих показателей также позволяет определить тип индивидуальности, хотя и с несколько меньшей точностью (74%).

Таким образом, экспресс-диагностику типа индивидуальности человека можно проводить, зная показатели экстраверсии и нейротизма по тесту Айзенка, уровень мануальной асимметрии, значение вегетативного индекса Кердо. Для определения этих показателей необходимы только опросник Айзенка, кистевой динамометр, тонометр для измерения артериального давления и секундомер для подсчета частоты пульса. Для определения типа индивидуальности необходимо вычислить значения классификационных функций (1)–(4).

$$F1=1,64*E+0,28*MA+0,78*N+0,01*VI-13,69, (1)$$

$$F2=2,18*E-0,02*MA+1,10*N+0,03*VI-20,95, (2)$$

$$F3=1,63*E-0,55*MA+1,76*N-0,03*VI-24,25, (3)$$

$$F4=2,57*E+0,16*MA+1,16*N+0,08*VI-27,71, (4)$$

где E – экстраверсия (баллы), MA – мануальная асимметрия (отн. ед.), N – нейротизм (баллы), VI – вегетативный индекс Кердо (отн. ед.).

Объект относится к типу индивидуальности, классификационная функция для которого окажется максимальной. Для проверки прогностических возможностей модели она была использована для определения типа индивидуальности студентов ТУСУРа. Уровень адаптации к образовательной среде технического вуза оценивали по двум показателям: реактивная тревожность и количество жалоб на ухудшение здоровья в последнее время. Классифицированы 299 студентов 2–4-х курсов, юношей в возрасте от 17 до 25 лет.

К «ориентировочно-исследовательским» типам индивидуальности были отнесены 75% студентов, а к типам с преобладанием оборонительных реакций – 25% (таблица). Максимальным уровнем реактивной тревожности отличалась группа с активно-оборонительной реакцией. В этой же группе выявлено наибольшее количество жалоб на ухудшение здоровья в последнее время ($p < 0,01$, критерий Манна–Уитни).

Результат классификации студентов ТУСУР

Тип индивидуальности	Количество студентов	Уровень тревожности (баллы)
Пассивно-оборонительная	36 (12%)	36,6±1,3
Активно-оборонительная	39 (13%)	41,4±1,6
Ориентировочно-эмоциональная	88 (29%)	36,0±0,8
Ориентировочно-когнитивная	136 (45%)	35,8±0,7
Итого	299 (100%)	36,7±0,5

Полученные результаты подтверждают прогностическую ценность модели и хорошо согласуются с литературными данными о роли поисковой активности в процессах адаптации человека к учебной деятельности.

Известно, что соотношение ориентировочно-исследовательских и оборонительных реакций влияет на эффективность обучения [19]. Ориентировочная активность благотворно сказывается на результатах обучения. Если предъявляемые требования оказываются выше способности мозга к переработке информации, происходит подавление ориентировочно-исследовательских реакций и замещение их оборонительными. Пассивная форма оборонительной реакции характеризуется депрессией или потерей интереса к учебе, активная выражается в агрессивных проявлениях.

Разработанная прогностическая модель реализована в виде компьютерной программы, которая

может быть использована для выявления группы риска среди студентов первого курса. Эффективная профилактика развития дезадаптивных состояний в процессе обучения может быть реализована путем индивидуального дозирования учебной нагрузки, создания ситуации успеха, стимуляции творческой активности и привлечения студентов к исследовательской деятельности.

Выводы

В ходе работы созданы модель и компьютерная программа для прогноза успешности адаптации человека к информационной нагрузке. Основой модели стал комплекс индивидуально-типологических особенностей человека, связанных с характером ориентировочного рефлекса, который рассматривается как элементарная модель адаптации к информационным воздействиям окружающей среды.

Для создания модели использованы методы многомерного статистического анализа. Полученная модель апробирована в исследованиях адаптации студентов ТУСУРа к учебной деятельности и показала высокие прогностические возможности.

Модель реализована в виде компьютерной программы, которая может быть использована для выявления группы риска среди студентов.

Благодарности

Автор благодарит за ценные рекомендации и моральную поддержку при подготовке статьи профессора кафедры РЭТЭМ Г.В. Смирнова, профессора кафедры АСУ В.Г. Астафурова, заведующего кафедрой РЭТЭМ В.И. Туева.

Литература

- Гапанович С.О. К вопросу об информационной антропоэкологии / С.О. Гапанович, В.Ф. Левченко // Принципы экологии. – 2017. – № 4. – С. 4–16.
- Eryomin A. Information ecology – A viewpoint // International Journal of Environmental Studies. – 1998. – № 54. – P. 241–253.
- Петрова Е.В. Проблема диалектической взаимосвязи природного и социального аспектов адаптации человека в экосистеме информационного общества // Философия науки и техники. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 78–92.
- Курдавильцева С.Б. Информация как фактор окружающей среды, влияющий на здоровье населения // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2010. – № 16. – С. 1567–1569.
- Дружилов С.А. Негативные воздействия современной информационной среды на человека: психологические аспекты // Психологические исследования. – 2018. – Т. 11, № 59. – С. 11 [Электронный ресурс]. – URL: <http://psystudy.ru> (дата обращения: 12.02.2019).
- Ушаков И.Б. Паттерны функциональных состояний оператора / И.Б. Ушаков, А.В. Богомолов, Ю.А. Кукушкин. – М.: Наука, 2010. – 390 с.
- Вяткин Б.А. Теория интегральной индивидуальности В.С. Мерлина: история и современность / Б.А. Вяткин, Л.Я. Дорфман // Образование и наука. – 2017. – № 2. – С. 145–160.
- Белоус В.В. Введение в психологию полиморфной индивидуальности. – М.: КНОРУС; Пятигорск: Пятигорский гос. лингвистический ун-т, 2016. – 268 с.

9. Гергет О.М. Моделирование процессов адаптации / О.М. Гергет, В.А. Кочегуров, Е.Ю. Титаренко // Научное обозрение. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 125–126.

10. Диагностика состояния человека: математические подходы / А.В. Богомолов, Л.А. Гридин, И.А. Кукушкин, И.Б. Ушаков. – М.: Медицина, 2003. – 464 с.

11. Миронкина Ю.Н. Информационная технология статистического синтеза критериев и алгоритмов оценки функционального состояния человека в прикладных медико-биологических исследованиях / Ю.Н. Миронкина, А.Ф. Бобров // Информационные технологии. – 1998. – № 3. – С. 41–47.

12. Абунавас Х.А. Модели и алгоритмы адаптации субъектов профессиональной деятельности к условиям производственной среды / Х.А. Абунавас, О.Г. Берестнева // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2009. – Т. 314, № 5. – С. 216–220.

13. Берестнева О.Г. Основные этапы процесса индивидуальной адаптации / О.Г. Берестнева, А.М. Уразаев, И.Л. Шелехов // Научное обозрение. Биологические науки. – 2014. – № 1. – С. 33–34.

14. Ильин Е.П. Психология индивидуальных различий. – СПб.: Питер, 2011. – 701 с.

15. Bradley M.M. Natural selective attention: Orienting and emotion // *Psychophysiology*. – 2009. – № 1. – P. 1–11.

16. Медведев В.И. Адаптация человека. – СПб.: Ин-т психологии: Ин-т мозга человека, 2003. – 551 с.

17. Несмелова Н.Н. Многомерные методы исследования биологических систем / Н.Н. Несмелова, Е.Г. Незнамова, Г.В. Смирнов. – Томск: ТУСУР, 2013. – 155 с.

18. Цуканов Б.И. Время в психике человека. – Одесса: Астропринт, 1999. – 220 с.

19. Ротенберг В.С. Поисковая активность и адаптация / В.С. Ротенберг, В.В. Аршавский. – М.: Наука, 1984. – 193 с.

orienting-exploratory reaction contributes to the successful adaptation to the information load, whereas the defensive response options lead to the rapid development of maladaptive states. The model was implemented as a computer program and was tested during studies of the adaptation of TUSUR students to educational activities.

Keywords: human, adaptation, information load, orienting reflex, individual typological features, cluster analysis, discriminant analysis, prognostic model.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-114-118

References

1. Gapanovich S.O., Levchenko V.F. On the Issue of Information Anthroecology. *Principles of Ecology*, 2017, no. 4, pp. 4–16 (in Russ.).

2. Eryomin A. Information ecology - A viewpoint. *International Journal of Environmental Studies*, 1998, no. 54, pp. 241–253.

3. Petrova E.V. The problem of the dialectical interconnection of the natural and social aspects of human adaptation in the ecosystem of the information society. *Philosophy of Science and Technology*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 78–92 (in Russ.).

4. Kurdaviltseva S.B. The information – as the factor of the environment influencing health of the population. *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, no. 1–6, pp. 1567–1569 (in Russ.).

5. Druzhilov S.A. The negative impact of the modern information environment: the psychological aspects. *Psikhologicheskie Issledovaniya*, 2018, vol. 11, no. 59, pp. 11 (in Russ.). Available at: <http://psystudy.ru> (accessed: February 14, 2019).

6. Ushakov I.B., Bogomolov A.V., Kukushkin Yu. A. *Patterns of functional states of an operator*. M., Science, 2010. 390 p.

7. Vyatkin B. A., Dorfman L. Ya. Theory of integral individuality by V.S. Merlin: history and nowadays. *The Education and Science Journal*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 145–160 (in Russ.).

8. Belous V.V. *Introduction to the psychology of polymorphous personality*. M., KNORUS, Pyatygorsk, Pyatigorsk State Linguistic University, 2016. 268 p.

9. Gerget O.M., Kochegurov V. A., Titarenko E.Y. Simulation of adaptation processes. *Scientific Review. Engineering science*, 2015, no. 1, pp. 125–126 (in Russ.).

10. Bogomolov A.V., Gridin L. A., Kukushkin I. A., Ushakov I.B. *Diagnostics of the human condition: mathematical approaches*. M., Medicine, 2003. 464 p.

11. Mironkina Yu.N., Bobrov A.F. Information technology of statistical synthesis of criteria and algorithms for assessing the functional state of a person in applied medical and biological studies. *Information Technologies*, 1998, no. 3, pp. 41–47 (in Russ.).

12. Abunavas Kh.A., Berestneva O.G. Models and algorithms of adapting professional activity subjects to working environment conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 5. pp. 216–220 (in Russ.).

13. Berestneva O.G., Urazaev A.M., Shelekhov I.L. Milestones of individual adaptation. *Scientific Review. Biological sciences*, 2014, no. 1. pp. 33–34 (in Russ.).

14. Ilyin E.P. *Psychology of Individual Differences*. St. Petersburg, Peter, 2011, 701 p.

15. Bradley M.M. Natural selective attention: Orienting and emotion. *Psychophysiology*, 2009, no. 1. pp. 1–11.

16. Medvedev V.I. *Adaptation of man*. SPb., Institute of Psychology, Institute of the Human Brain, 2003. 551 p.

Несмелова Нина Николаевна

Канд. биол. наук, доцент каф. радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID 0000-0003-0052-7913
Тел.: +7 (382-2) 70-15-06
Эл. почта: nina.n.nesmelova@tusur.ru

Nesmelova N.N.

Prognostic model of human adaptation to the information load

Approaches to the study of human adaptation using mathematical modeling are discussed in the article. A description of the model for predicting human adaptation to the information load is presented. The complex of individual typological features of a person, associated with the nature of the orienting reflex, became the basis of the model. The methods of cluster and discriminant analysis are used to create a model. In contrast to the solutions proposed by other authors, the model determines the characteristic response of a person to informational influences of the environment. It is shown that the ori-

17. Nesmelova N.N., Neznamova E.G., Smirnov G.V. *Multidimensional methods for the study of biological systems*. Tomsk, TUSUR, 2013. 155 p.

18. Tsukanov B. I. *Time in the human psyche: monograph*. Odessa, Astroprint, 1999. 220 p.

19. Rotenberg V. S., Arshavsky V. V. *Search activity and adaptation*. M., Science, 1984. 193 p.

Nina N. Nesmelova

Candidate of Biology, Associate Professor
Department of Radioelectronic Technologies and
Environmental Monitoring Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID 0000-0003-0052-7913
Phone: +7 (382-2) 70-15-06
E-mail: nina.n.nesmelova@tusur.ru

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК: 621.311.62

В.М. Рулевский

Методика определения оптимального напряжения и частоты переменного тока в трехфазном кабель-тросе системы электропитания подводного аппарата

Представлена методика определения оптимальных значений трехфазного напряжения и частоты в кабель-тросе системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата для обеспечения минимальной токовой нагрузки с учетом собственной емкости кабель-троса.

Ключевые слова: телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, система электропитания, напряжение, частота, кабель-трос, трехфазный инвертор, реактивный ток.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-121-127

Для выполнения различного вида работ на морском дне все чаще используют телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) с глубиной погружения до 6000 м. Основным элементом подводного аппарата является система электропитания (СЭП), которая обеспечивает надежное функционирование различной научно-исследовательской и специальной аппаратуры. Описание вариантов выполнения систем электропитания, достоинств и недостатков каждого из них достаточно подробно изложено в работах [1–11]. Анализ источников литературы показывает, что в настоящее время для обеспечения высоких удельных характеристик СЭП ТНПА целесообразно применять систему с передачей энергии по кабель-тросу на переменном трехфазном токе повышенной частоты. В данных системах ТНПА и надводный корабль (судно-носитель) соединены друг с другом трехфазным кабель-тросом (линией связи), содержащим три токопроводящие жилы для передачи на подводный аппарат питающего напряжения. Формирование трехфазного напряжения осуществляется автономным инвертором, расположенным в бортовой части СЭП [12, 13].

Разработанная и предложенная методика определения оптимального напряжения и частоты позволит минимизировать токовую нагрузку на жилы кабель-троса и обеспечит требуемые массогабаритные показатели бортовой и подводной части СЭП ТНПА.

Конструктивно кабель-трос (рис. 1) изготовлен в виде двухслойной намотки в противоположных направлениях вокруг кабеля стальных проволок, выполняющих для проводников кабеля роль экранирующей оплетки. Этот экран является одновременно и броней кабель-троса, он электрически соединен с корпусом корабля и корпусом ТНПА [14].

Силовые жилы кабель-троса имеют относительно друг друга и относительно брони паразитную емкость, которая является дополнительной нагрузкой реактивного характера для инвертора и кабель-троса. В рабочем режиме вследствие обжатия кабель-троса гидростатическим давлением происходит увеличение этих паразитных емкостей.

Влияние емкостной дополнительной нагрузки на элементы инвертора (силовые ключи, выходной

трансформатор) устраняют подключением к выходу инвертора трехфазного компенсирующего устройства [15, 16]. Компенсирующее устройство позволяет защитить от емкостного тока только инвертор, но не разгружает кабель-трос.

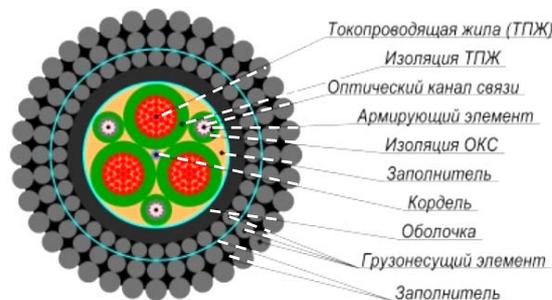


Рис. 1. Кабель-трос типа КГ (ООО «Псковгеокабель»)

Обоснование выбора напряжения

Для определения токовой нагрузки в кабель-тросе и оптимального питающего напряжения, для примера, выполним анализ работы реального кабель-троса (таблица), имеющего паразитные емкости токопроводящих жил между собой и относительно броневой оплетки.

В таблице приведены параметры кабель-троса, рассчитанного на мощность 60 кВт, длиной 6000 м.

Параметры кабель-троса, рассчитанные на мощность 60 кВт, длиной 6000 м	
Фазное напряжение V_{ϕ}	1000 В
Линейное напряжение $V_{\text{л}}$	1740 В
Емкость фазная C_{ϕ}	0,66 мкФ
Емкость линейная $C_{\text{л}}$	0,833 мкФ
Сопротивление X_{ϕ}	191,2 Ом
Сопротивление $X_{\text{к}}$	241,3 Ом
Частота напряжения f	1 кГц

Предполагается, что параметры трехфазной системы питающих напряжений и кабель-троса являются симметричными, а нагрузка распределена равномерно по фазам. Схема СЭП ТНПА с однозвенной схемой замещения кабель-троса приведена на рис. 2.

В схему замещения кабель-троса введен дополнительный резистор $R7$, который необходим для корректной работы программы моделирования, в реальной схеме он отсутствует.

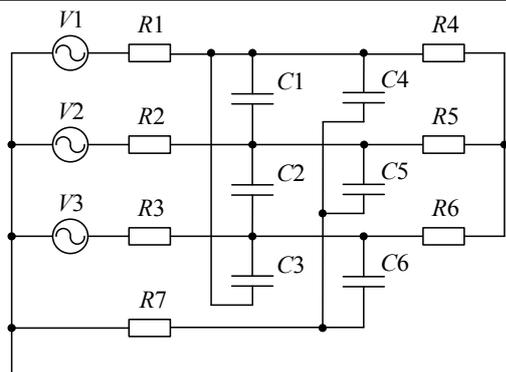


Рис. 2. Однозвенная схема замещения кабель-троса

Источники переменного напряжения $V1$, $V2$, $V3$, соединенные в «звезду», образуют трехфазный источник питания ТНПА (фазы A , B , C). Данный источник питания связан с трехфазным питающим входом ТНПА трехжильным кабель-тросом.

На схеме резисторы $R1$, $R2$, $R3$ представляют омическое сопротивление жил кабеля; конденсаторы $C1$, $C2$, $C3$ имитируют паразитные емкости жил кабель-троса между собой (линейные емкости $C_{л}$); конденсаторы $C4$, $C5$, $C6$ имитируют паразитные емкости жил кабель-троса относительно брони (фазные емкости $C_{ф}$). Токотприемники ТНПА представлены резистивной трехфазной нагрузкой, выполненной на элементах $R4$, $R5$, $R6$, соединенных по схеме «звезда».

При исследовании схемы рассматривается случай полной симметрии трехфазного кабель-троса $C1 = C2 = C3 = C_{л}$ и $C4 = C5 = C6 = C_{ф}$, так как в реальной схеме кабель-трос подключен к нагрузке через согласующий трехфазный трансформатор и трехфазный неуправляемый выпрямитель. Также считается симметричным трехфазный источник питания.

На рис. 3 приведена векторная диаграмма напряжений и токов для схемы, представленной на рис. 2 [17–19]. На диаграмме стрелками показаны направления токов и напряжений, принятые за положительные, а также указаны следующие векторы: V_A , V_B , V_C – фазных напряжений; I_{An} – тока нагрузки фазы A ; I_{C1} , I_{C3} , I_{C4} – емкостных составляющих тока фазы A , протекающих через паразитные емкости $C1$, $C3$, $C4$.

На схеме замещения (см. рис. 2) конденсаторы $C1$, $C2$, $C3$ соединены по схеме «треугольник». Положительное направление тока принято по часовой стрелке.

Емкостной ток $I_{Aемк}$ фазы A равен векторной сумме трех токов, протекающих через паразитные емкости $C1$, $C3$, $C4$:

$$I_{Aемк} = I_{C1} + (-I_{C3}) + I_{C4}. \quad (1)$$

Для нахождения данных токов определим реактивные сопротивления паразитных емкостей кабель-троса $C1 \dots C6$:

$$X_{C1} = X_{C2} = X_{C3} = X_{л} = (-j)/\omega C_{л};$$

$$X_{C4} = X_{C5} = X_{C6} = X_{ф} = (-j)/\omega C_{ф},$$

где $X_{л}$ – реактивное сопротивление линейной емкости; $X_{ф}$ – реактивное сопротивление фазной емкости; ω – угловая частота питающего напряжения.

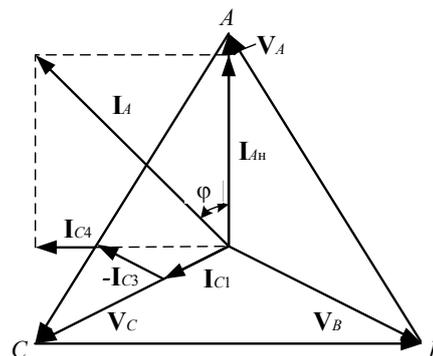


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений и токов однозвенной схемы замещения кабель-троса

Ток I_{C1} протекает через емкость $C1$ под действием линейного напряжения V_{CB} , опережает его по фазе на угол 90° и определяется выражением

$$I_{C1} = \frac{V_{AB}}{X_{л}} = \frac{V_{AB}\omega C_{л}}{-j} = jV_{AB}\omega C_{л}. \quad (2)$$

Ток I_{C3} протекает через емкость $C3$ под действием линейного напряжения V_{CA} , опережает его по фазе на угол 90° и определяется выражением:

$$I_{C3} = \frac{V_{CA}}{X_{л}} = \frac{V_{CA}\omega C_{л}}{-j} = jV_{CA}\omega C_{л}. \quad (3)$$

В выражении (1) для тока $I_{Aемк}$ составляющая I_{C3} имеет знак «минус», так как ток I_{C3} имеет отрицательное направление [17].

Паразитные емкости жил кабель-троса относительно брони (емкости $C4$, $C5$, $C6$) соединены между собой через броню кабель-троса по схеме «звезда». При таком соединении одинаковых емкостей потенциал их общей точки, т.е. брони, относительно общей точки источника питания равен нулю. Поэтому заряд/разряд емкостей $C4$, $C5$, $C6$ происходит под действием соответствующего фазного напряжения: V_A , V_B или V_C . В частности, емкость $C4$ заряжается/разряжается током I_{C4} , который протекает под действием фазного напряжения V_A , опережает это напряжение на угол 90° и определяется следующим выражением:

$$I_{C4} = \frac{V_A}{X_{ф}} = \frac{V_A\omega C_{ф}}{-j} = jV_A\omega C_{ф}. \quad (4)$$

Подставив в формулу для емкостного тока $I_{Aемк}$ фазы A выражения (2)–(4), получим

$$I_{Aемк} = I_{C1} + (-I_{C3}) + I_{C4} = jV_{AB}\omega C_{л} - jV_{CA}\omega C_{л} + jV_A\omega C_{ф}. \quad (5)$$

На векторной диаграмме вектор I_{C1} является перпендикуляром к вектору V_{AB} ; вектор $-I_{C3}$ – перпендикуляром к вектору V_{CA} ; вектор I_{C4} – перпендикуляром к вектору V_A . Все эти векторы направлены в сторону опережения соответствующих векторов напряжения. Сумма векторов (5) представляет собой реактивный ток емкостного характера, протекающий по фазе A .

На векторной диаграмме векторы I_{C1} и $-I_{C3}$ расположены под углом 30° к мнимой оси j . Поэтому модуль вектора $I_{Aемк}$, равный его проекции на мнимую ось, можно определить следующим образом:

$$|I_{Aемк}| = I_{Aемк} = \frac{2V_\phi \sqrt{3} \cos 30}{X_L} + \frac{V_\phi}{X_\phi} \quad (6)$$

В выражении (6) учтено соотношение $V_\phi \sqrt{3} = V_L$, а также равенство емкостей $C1 = C3 = C_L$, $C4 = C_\phi$.

Для удобства построения кривых упростим выражение (6):

$$I_{Aемк} = \left(2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,866 \cdot \frac{X_\phi}{X_L} + 1 \right) \frac{V_\phi}{X_\phi} = \left(2,96 \frac{C_L}{C_\phi} + 1 \right) \frac{V_\phi}{X_\phi} \quad (7)$$

Значения емкостей C_L , C_ϕ в технической документации на кабель-трос не приводятся. Эти данные находятся непосредственным измерением. В случае если емкость жил кабель-троса между собой (C_L) и емкость жилы относительно брони (C_ϕ) близки по величине, то в выражении (7) будем считать $C_L / C_\phi = 1$, тогда

$$I_{Aемк} = 4 \frac{V_\phi}{X_\phi} \quad (8)$$

Если емкости C_L и C_ϕ существенно отличаются по величине, в выражении (7) следует учесть реальное значение соотношения C_L / C_ϕ :

$$I_{Aемк} = \left(2,96 \frac{C_L}{C_\phi} + 1 \right) \frac{V_\phi}{X_\phi} \quad (9)$$

Ток $I_{Aемк}$ потребляется собственной паразитной емкостью кабель-троса, которая равномерно распределяется вдоль всей его длины. Ток $I_{Aемк}$ имеет максимальное значение в начале кабель-троса, а затем линейно уменьшается до нуля в конце кабель-троса [20].

Активная составляющая тока нагрузки фазы A (I_{An}) зависит от установленной нагрузки ТНПА. Этот ток может изменяться от нуля до максимального значения, определяемого пропускающей способностью жилы кабель-троса. Полный ток I_A фазы A находится как векторная сумма тока нагрузки I_{An} и емкостного тока $I_{Aемк}$ фазы A :

$$I_A = I_{An} + j I_{Aемк} \quad (10)$$

Подсчитаем величину тока по формуле (6) для параметров кабель-троса, указанных в таблице. После подстановки данных в формулу (6) получаем действующее значение тока:

$$I_{Aемк} = 2 \cdot 1000 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\cos 30}{241,3} + \frac{1000}{191,2} = 17,7 \text{ А} \quad (11)$$

Определим амплитудное значение этого тока:

$$I_{Aемк} = 17,7 \cdot \sqrt{2} = 24,9 \text{ А} \quad (12)$$

На рис. 4 приведены диаграммы сигналов, полученных при моделировании схемы, представленной на рис. 2, на холостом ходу.

Токи, протекающие через конденсаторы $C1$, $C4$ (I_{C1} , I_{C4}), и инверсный ток ($-I_{C3}$), протекающий через $C3$, представлены на верхней диаграмме. На нижней диаграмме представлен емкостный ток фазы A , рав-

ный сумме токов I_{C1} , ($-I_{C3}$) и I_{C4} согласно выражению (6). Амплитудное значение этого тока, найденное при моделировании, равно 24,8 А, полученное при расчете равно 24,9 А. Расхождение результатов объясняется в основном тем, что при расчете не учитывались сопротивление жилы кабель-троса и внутреннее сопротивление источника питания.

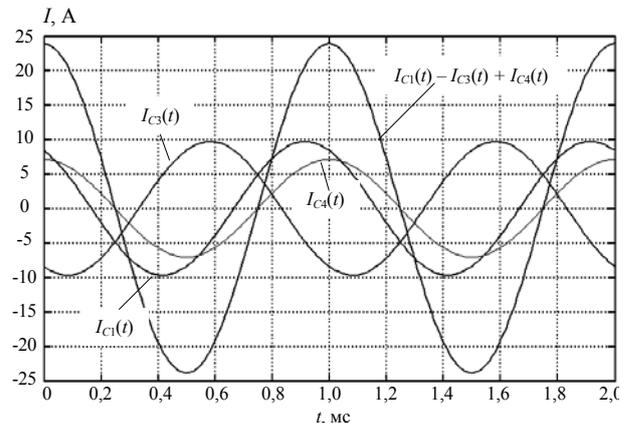
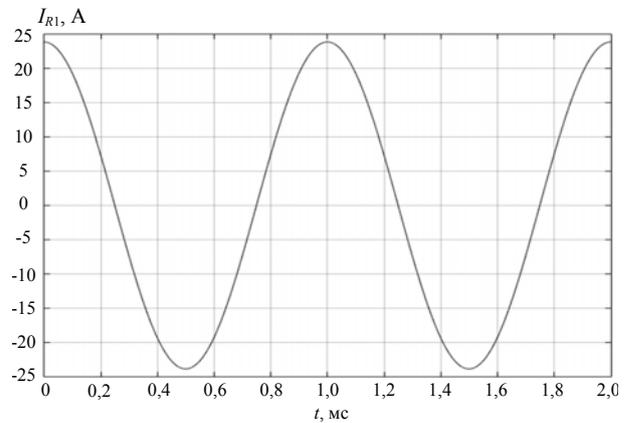


Рис. 4. Диаграммы токов в однофазной схеме кабель-троса

Расчетное значение этого тока на расстоянии l от начала кабель-троса можно определить по следующему выражению:

$$I(l) = I_{нач} (l - l/L), \quad (13)$$

где $I_{нач}$ – фазный ток в начале кабель-троса; $I(l)$ – фазный ток в кабель-тросе на расстоянии l от начала; l – текущее расстояние от начала кабель-троса; L – длина кабель-троса.

Ток в начале кабель-троса $I_{нач}$, можно определить по выражению (6). График выражения (13) представлен на рис. 5.

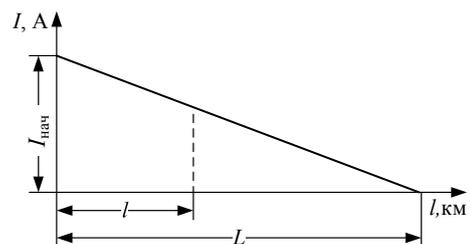


Рис. 5. График для определения тока в произвольной точке кабель-троса

До сих пор исследовался реактивный ток емкостного характера, потребляемый кабель-тросом. Ток нагрузки I_n , потребляемый ТНПА, обозначен на рис. 3 вектором I_{An} . Сумма векторов I_{An} и $I_{Aемк}$ образует вектор фазного тока I_A , опережающего на угол φ вектор фазного напряжения V_A . Этим углом определяется значение коэффициента мощности, или $\cos \varphi$, с которым потребляется энергия от инвертора. При увеличении тока нагрузки I_{An} от нуля до максимального значения, определяемого пропускающей способностью жилы кабель-троса, $\cos \varphi$ возрастает также от нуля до максимального значения.

Ток нагрузки, потребляемый ТНПА, в данном исследовании полагается чисто активным. Вектор I_{An} совпадает по фазе с вектором фазного напряжения V_ϕ . Величина тока I_n зависит от заданной мощности нагрузки P_n , приходящейся на одну фазу, и от величины фазного напряжения V_ϕ :

$$I_n = \frac{P_n}{V_\phi}. \quad (14)$$

Полный ток I_A , потребляемый кабель-тросом по фазе A , определяется векторной суммой тока нагрузки I_n и емкостного тока $I_{Aемк}$:

$$I_A = I_n + jI_{Aемк}. \quad (15)$$

После подстановки в выражение (15) I_n из равенства (14), $I_{Aемк}$ из (8) получаем выражение для фазного тока I_A :

$$I_A = \frac{P_n}{V_\phi} + j4 \frac{V_\phi}{X_\phi}. \quad (16)$$

Выражение (16) позволяет построить семейство характеристик $I_A = f(V_\phi)$ для ряда значений P_n .

Модуль фазного тока I_A , равный длине вектора I_A (см. рис. 3), определяется следующим выражением (17):

$$|I_A| = \sqrt{\left(\frac{P_n}{V_\phi}\right)^2 + \left(4 \frac{V_\phi}{X_\phi}\right)^2}. \quad (17)$$

В подкоренном выражении (17) первое слагаемое обратно пропорционально напряжению V_ϕ , второе слагаемое – прямо пропорционально ему. Сумма этих слагаемых имеет минимум при $V_\phi = V_{\phi опт}$:

$$V_{\phi опт} = \sqrt{P_n X_\phi / 4}. \quad (18)$$

При мощности на фазе 20 кВт, $X_\phi = 191,2$ Ом согласно формуле (18) $V_{\phi опт} = 978$ В. Подставим выражение (18) в (17), получим формулу для расчета минимальной величины фазного тока $I_{A мин}$, который потребляется по кабель-тросу при оптимальном фазном напряжении $V_{\phi опт}$ и передаваемой мощности P_n :

$$I_{A мин} = \sqrt{8P_n / X_\phi}. \quad (19)$$

При вышеуказанных параметрах (P_n , X_ϕ) согласно равенству (19) ток $I_{A мин} = 28,9$ А. Режим работы кабель-троса при $V_{\phi опт}$ является оптимальным, так как обеспечивает минимальный ток в жилах кабель-троса. Полную мощность S , потребляемую каждой фазой кабель-троса в этом режиме, можно определить как

$$S = V_{A опт} I_{A мин} = 2P_n. \quad (20)$$

Из данного выражения следует, что при работе кабель-троса в оптимальном электрическом режиме потребляемая им полная мощность S численно равна удвоенной мощности нагрузки.

Используя выражение (17), можно построить вольт-амперную характеристику (ВАХ) $I_A = f(P_n, V_\phi)$ для ряда значений мощности P_n . На рис. 6 представлена ВАХ для мощности нагрузки на одну фазу $P_n = 20$ кВт.

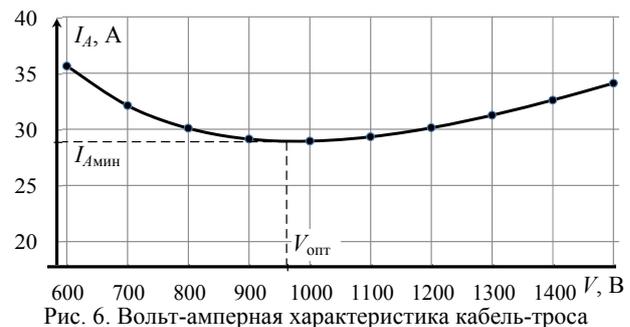


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика кабель-троса

Построенная ВАХ показывает, что при фазном напряжении 978 В потребляемый кабель-тросом ток при передаваемой мощности 20 кВт на фазу имеет наименьшее значение. Поэтому данный режим передачи электроэнергии можно считать оптимальным.

Обоснование выбора частоты

Величина частоты напряжения при передаче энергии по кабель-тросу на переменном токе, как отмечено ранее, также оказывает влияние на ряд важных параметров СЭП ТНПА. Увеличение частоты напряжения переменного тока ведет к уменьшению массы и габаритов подводной части СЭП по экспоненциальному закону. Габариты СЭП ТНПА в основном определяют намоточные элементы системы (входной трехфазный понижающий трансформатор составляет до 80% от общих габаритов и массы подводной части СЭП), и с увеличением частоты массогабаритные показатели трансформаторов и дросселей существенно улучшаются. Это связано с тем, что ЭДС E , наводимая в обмотках трансформатора, выражается формулой [21, 22]

$$E = 4k_\phi w f B_m S, \quad (21)$$

где k_ϕ – коэффициент формы напряжения; w – число витков обмотки; f – частота преобразования; B_m – амплитуда индукции; S – сечение сердечника.

Из выражения (21) следует, что с увеличением частоты преобразования f при неизменной величине ЭДС E необходимо уменьшать либо число витков w , либо индукцию B_m , либо сечение сердечника S . В любом случае это приводит к уменьшению массы и габаритов всего трансформатора. Однако учитывая, что потери в стали пропорциональны частоте в степени 1,3, а индукции – в квадрате, для исключения перегрева трансформатора приходится снижать индукцию с ростом частоты по закону

$$B \approx 1/f^{0,65}. \quad (22)$$

В связи с этим масса трансформатора m с увеличением частоты f сначала снижается быстро, затем значительно медленнее до достижения оптимального значения частоты.

На рис. 7 представлена зависимость приведенной массы трансформатора $m_{\text{тр}}$ с сердечником типа ГМ54ДС из ленты магнитомягкого нанокристаллического сплава на основе железа толщиной 25 мкм и удельных магнитных потерь $P_{\text{уд.тр}}$ от частоты питающего напряжения f при номинальной мощности 20 кВт, которая получена экспериментально. Из рис. 7 следует, что оптимальное значение частоты $f_{\text{опт}}$ для данного трансформатора находится в диапазоне от 0,8 до 1,2 кГц, что обеспечивает высокие удельные характеристики при низких удельных магнитных потерях.

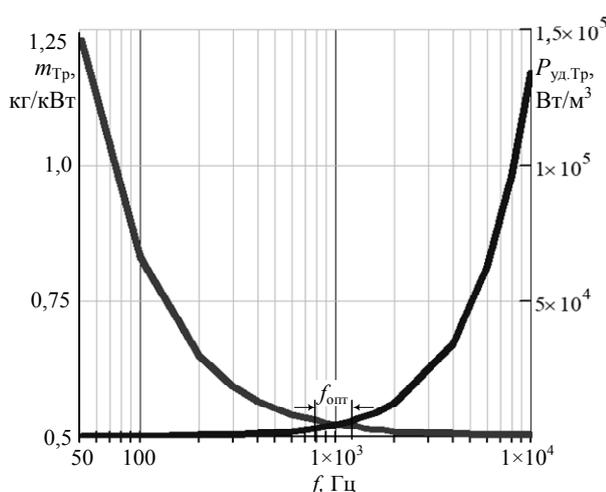


Рис. 7. Зависимость приведенной массы трансформатора и удельных магнитных потерь от частоты питающего напряжения

В современных СЭП ТНПА в качестве сердечников для силовых входных трансформаторов подводной части все чаще применяют магнитопроводы из аморфных и нанокристаллических сплавов типа ГМ42ДС, ГМ54ДС и др. с высокой начальной магнитной проницаемостью, низкой остаточной магнитной индукцией и малыми удельными магнитными потерями [23, 24]. Высокие рабочие частоты магнитопроводов при низких удельных магнитных потерях обеспечивают высокие удельные характеристики трансформаторов и дросселей системы.

Увеличение частоты есть необходимое условие уменьшения массогабаритных показателей. Но с другой стороны, увеличение частоты имеет отрицательные последствия. С увеличением частоты растет паразитная емкостная составляющая тока кабель-троса, которую необходимо компенсировать дросселем, что в свою очередь увеличивает габариты бортовой и подводной частей СЭП ТНПА. К тому же у каждого кабель-троса есть максимально допустимые параметры проводимого тока и с ростом пропускной составляющей тока резко увеличивается масса кабель-троса, что недопустимо.

Выводы

Таким образом, существуют определенные значения частоты и напряжения для конкретной структуры СЭП ТНПА, при которых удельные магнитные потери, величина индуктивности дросселя, масса и габариты трансформаторов и кабель-троса находятся в балансе. Для рассмотренной СЭП ТНПА с кабель-тросом длиной до 6000 м и мощностью 60 кВт оптимальной величиной переменного фазного напряжения и частоты в кабель-тросе является $V_{\phi} = 978$ В и $f = 1000$ Гц.

Предложенная методика дает возможность обоснованно подойти к выбору величины напряжения и частоты в кабель-тросе при передаче энергии по кабелю на переменном токе с учетом собственной емкости.

Литература

1. Подводные аппараты для геологических исследований / под ред. А.М. Игнатова. – Геленджик: ПО «Южморгеология», 1990. – 92 с.
2. Привязные подводные системы: Прикладные задачи статики и динамики / Н.И. Виноградов, М.Л. Гутман, И.Г. Лев, М.З. Нисневич. – СПб.: СПбГУ, 2000. – 313 с.
3. Войтов Д.В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. – М.: МОРКНИГА, 2012. – 506 с.
4. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-ropе (Article number 012098) / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.O. Kuleshova, E.B. Shandarova, S.M. Shandarov, Yu.Z. Vasilyeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, October 27–29, 2017. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2017. – Vol. 177(1).
5. Voltage stabilizer in power supply of underwater vehicle (Article number 022018) / V.M. Rulevskiy, V.A. Chekh, Y.A. Shurygin, A.A. Pravikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, December 4–6. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – Vol. 327(2).
6. Bukreev V.G. Power supply system model of remote processing equipment / V.G. Bukreev, E.B. Shandarova, V.M. Rulevskiy // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2018. – Vol. 329(4). – P. 119–131.
7. Taking power distribution under the sea: Design, manufacture, and assembly of a Subsea electrical distribution system / T. Hazel, H.H. Baerd, J.J. Legeay, J.J. Bremnes // IEEE Industry Applications Magazine. – 2013. – Vol. 19(5), No. 6553138. – P. 58–67.
8. Рулевский В.М. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов / В.М. Рулевский, Ю.Н. Дементьев, О.В. Бубнов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2004. – Т. 307, № 5. – С. 120–123.
9. Мишин В.Н. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов переменного тока мощностью свыше 10 кВт / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 107–110.
10. Мишин В.Н. Система электропитания универсального многоканального телеуправляемого необитаемого буксируемого комплекса / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.А. Тарасенко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 5. – С. 8–10.
11. Система электропитания глубоководного аппарата с высоковольтной передачей энергии постоянного

тока по кабель-тросу / В.М. Рулевский, В.А. Чех, В.Г. Букреев, Р.В. Мещеряков // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 1 (195). – С. 155–167.

12. Пат. 119905 РФ, МПК H01Q 1/34. Система электроснабжения подводного телеуправляемого аппарата с судна-носителя (варианты) / В.Н. Мишин (РФ), В.А. Пчельников (РФ), В.М. Рулевский (РФ), А.Г. Юдинцев (РФ). – № 2 012 117 672 / 08; заявл. 27.04.12; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 24. – 3 с.

13. Пат. 122530 РФ, МПК H02J 3/18. Система электроснабжения подводного телеуправляемого аппарата с судна-носителя с компенсацией реактивной мощности в кабель-тросе (варианты) / В.Н. Мишин (РФ), В.А. Пчельников (РФ), В.М. Рулевский (РФ), А.Г. Юдинцев (РФ). – № 2 012 124 602 / 07; заявл. 14.06.12; опубл. 27.11.2012. Бюл. № 33. – 2 с.

14. Кабели геофизические грузонесущие, кабели силовые, кабельные линии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pskovgeokabel.ru/products/0_8/ (дата обращения: 10.07.2019).

15. Пат. 87581 РФ, МПК H02J 3/18. Устройство для электроснабжения подводного аппарата с судна-носителя с компенсацией реактивной мощности в кабель-тросе / В.Н. Мишин (РФ), В.М. Рулевский (РФ), В.А. Пчельников (РФ), О.В. Бубнов (РФ). – № 2 008 142 707 / 22; заявл. 28.10.08; опубл. 10.10.2009. Бюл. № 28 – 2 с.

16. Рулевский В.М. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с компенсацией реактивной мощности // Научный журнал «Морские интеллектуальные технологии». – СПб., 2014. – № 2 (24). – С.14–17.

17. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с.

18. Ананичева С.С. Передача электроэнергии на дальние расстояния: учеб. пособие / С.С. Ананичева, П.И. Бартоломей, А.Л. Мызин. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1993. – 80 с.

19. Ананичева С.С. Методы расчета параметров электрических сетей и систем: метод. пособие / С.С. Ананичева, А.Л. Мызин. – Екатеринбург, 2002. – 56 с.

20. Азаров В.С. Передача и распределение электроэнергии в примерах и решениях: учеб. пособие. – М.: МГОУ, 2005. – 213 с.

21. Петрович В.П. Силовые преобразователи электрической энергии: учеб. пособие / В.П. Петрович, Н.А. Воронина, А.В. Глазачев. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – 240 с.

22. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: учеб. пособие / В.П. Обрусник. – Томск, 2012. – 125 с.

23. Ферромагнитные материалы Гаммет РС1 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://gamma-met.ru/misc/table2_DS.xls (дата обращения: 08.06.2018).

24. Гаммет. Магнитные свойства кольцевых магнитопроводов из анизотропной электротехнической стали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gamma-met.ru/ru/electro_d.htm (дата обращения: 08.06.2018).

Рулевский Виктор Михайлович

Канд. техн. наук, проректор по научной работе и инновациям Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9229-8611>
Тел.: +7-906-950-04-01

Эл. почта: rulevsky@nii.aem.tomsk.ru

Rulevskiy V.M.

Method to determine the optimal voltage and AC frequency in a three-phase cable-rope of the underwater power supply system

The article presents a methodology that allows determining the optimal values of three-phase voltage and frequency in a cable-rope of a power supply system for a remote-controlled unmanned underwater vehicle in order to ensure a minimum current load taking into account the cable-rope's own capacity.

Keywords: remote-controlled unmanned underwater vehicle, power supply system, load, frequency, cable-rope, three-phase inverter, blind current.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-121-127

References

1. *Podvodnye apparaty dlya geologicheskikh issledovaniy* [Underwater vehicles for geological applications]. Edited by A.M. Ignanov, Gelendzhik, Publishing office «Yuzhmoregeologia», 1990, 92 p.

2. Vinogradov N.I., Gutman M.L., Lev I.G., Nisnevich M.Z. *Privyaznye podvodnye sistemy: Prikladnye zadachy statiki i dinamiki* [Tethered underwater systems: Applied tasks in statistics and dynamics]. Saint Petersburg: SPBGU, 2000, 313 p.

3. Voitov D.V. *Telepravliaemye neobitaemye podvodnye apparaty* [Remote-controlled unmanned underwater vehicles], Moscow: «MORKNIGA», 2012, 506 p.

4. Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Kuleshova E.O., Shandarova E.B., Shandarov S.M., Vasilyeva Yu.Z. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope (Article number 012098). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, October 27–29, 2017*. Tomsk, Institute of Physics Publishing, 2017, vol. 177 (1).

5. Rulevskiy V.M., Chekh V.A., Shurygin Yu.A., Pravikova A.A.. Voltage stabilizer in power supply of underwater vehicle (Article number 022018). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, December 4–6, 2018*. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. vol. 327 (2).

6. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M.. Power supply system model of remote processing equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329 (4), pp. 119–131.

7. Hazel T., Baerd H.H., Legeay J.J., Bremnes J.J. Taking power distribution under the sea: Design, manufacture, and assembly of a Subsea electrical distribution system. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2013, vol. 19 (5), no. 6553138, pp. 58–67.

8. Rulevskiy V.M., Dementiev Yu.N., Bubnov O.V. *Sistema elekropitaniya teleupravlyaemikh podvodnikh apparatov* [Power supply systems for remote-controlled underwater vehicles]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004. vol. 307, no. 5, pp. 120–123.

9. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Yudin A.G. *Sistema elekropitaniya teleupravlyaemikh apodvodnikh apparatov peremennogo toka moshnosti svyshe 10kW* [Power supply systems for AC remote-controlled underwater vehicles with a power exceeding 10 kW]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013. vol. 322, no. 4, pp. 107–110.

10. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Tarasenko A.A. *Sistema elekropitaniya universalnogo teleupravlyaemogo neobitaemogo buksiruemogo kompleksa* [Power supply system for

multi-purpose multi-channel remote-controlled unmanned towed complex]. *Electronics and electrical equipment of transport*, 2014, no. 5, pp. 8–10.

11. Rulevskiy V.M., Chekh V.A., Bukreev V.G., Meshcheryakov R.V. *Sistema elektropitaniya glubokovodnogo apparata s visokovoltnoy peredachei energii postoyannogo toka po kabel-trossu* [Power supply systems for deep-diving submersible with high-voltage DC transmission via cable-rope]. *Bulletin of the YuFU. Engineering Sciences*, 2018, no. 1 (195), pp. 155–167.

12. Mishin V.N., Pchel'nikov V.A., Rulevskiy V.M., Yuditsev A.G. *Sistema elektrosnabzheniya podvodnogo teleupravlyаемого apparata s sudna-nositelya (varianty)* [Power supply system underwater vehicle controlled remotely from parent-vessel (options)]. Patent RF, no. 119905, 2012.

13. Mishin V.N., Pchel'nikov V.A., Rulevskiy V.M., Yuditsev A.G. *Sistema elektrosnabzheniya podvodnogo teleupravlyаемого apparata s sudna-nositelya (varianty)* [Power supply system underwater vehicle controlled remotely from parent-vessel (options)]. Patent RF, no. 122530, 2012.

14. *Kabeli geofizicheskie gruzonesushchie, kabeli silovye, kabelnie linii* [Carrying geophysical cables, supply cables, cable lines]. Electronic resource: http://pskovgeo-kabel.ru/products/0_8/ (Accessed: July 10, 2019).

15. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Pchel'nikov V.A., Bubnov O.V. *Ustroystvo dlya elektrosnabzheniya podvodnogo apparata s sudna-nositelya s kompensatsiyey reaktivnoi moshchnosti v kabele-trosse* [Device allowing power supply of underwater vehicle from parent-vessel with reactive power compensation in cable-rope]. Patent RF, no. 87581, 2008.

16. Rulevskiy V.M. *Sistema elektropitaniya teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo kompleksa s kompensatsiyey reaktivnoimoshchnosti* [Power supply system for remote-controlled unmanned underwater complex with reactive power compensation]. *Research journal «MORINTECH»*, Saint-Petersburg, 2014, no. 2 (24), pp. 14–17.

17. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical fundamentals of electrical engineering]. Moscow, OJSC «Vysshaya Shkola Publishers», 1973, 752 p.

18. Ananicheva S.S., Bartolomei P.I., Myzin A.L. *Peredacha elektroenergii na dalnye rasstoyaniya: Uchebnoe posobie*. [Long distance energy transmission: Learning Guide]. Yekaterinburg: UGTU-UPI, 1993, 80 p.

19. Ananicheva S.S., Myzin A.L. *Medody rascheta parametrov elektricheskikh setei i sistem: Metodicheskoe posobie* [Methods to calculate parameters for electric circuits and systems: Learning Guide]. Yekaterinbourg, 2002, 56 p.

20. Azarov V.S. *Peredacha i raspredelenie elektroenergii v primerakh i resheniyakh: Uchebnoe posobie* [Energy transmission and distribution in examples and solutions: Learning Guide]. Moscow: MGOU, 2005, 213 p.

21. Petrovich V.P., Voroshina N.A., Glazachev A.V. *Silovye preobrazovateli elektricheskoi energii: uchebnoe posobie* [Power converters for electrical energy: Learning Guide]. Tomsk: Publishing office of Tomsk Polytechnic University, 2009, 240 p.

22. Obrusnik V.P. *Magnitnye elementy elektronnykh ustroystv: uchebnoe posobie* [Magnetic components for electronic devices: Learning Guide]. Tomsk, 2012, 125 p.

23. *Ferromagnitnye materialy Gammamet PCI* [Ferromagnetic materials Gammamet PCI]. Electronic resource: http://gammamet.ru/misc/table2_DS.xls (Accessed: June 08, 2018).

24. *Gammamet. Magnitnye svoystva koltsevykh magnitoprovodov iz anizotropnoi elektrotehnicheskoi stali* [Gammamet. Magnetic properties of ring-type magnetic circuits made from anisotropic electrical steel]. Electronic resource: http://gammamet.ru/ru/electro_d.htm (Accessed: June 08, 2018).

Victor M. Rulevskiy

Candidate of Engineering, Vice-Rector for Research and Innovation, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9229-8611>
Phone: +7-906-950-04-01
Email: rulevsky@niaem.tomsk.ru

УДК 621.311.62

В.М. Рулевский

Техническая реализация и алгоритмическое обеспечение системы электропитания удалённого потребителя электроэнергии

Представлены техническая реализация и алгоритмы управления системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты, обеспечивающие стабилизацию напряжения на нагрузке с требуемой точностью.

Ключевые слова: глубоководный аппарат, система электропитания, автономный инвертор напряжения, векторная широтно-импульсная модуляция.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-128-134

В настоящее время для выполнения научных, поисковых, спасательных и других видов работ при исследовании Мирового океана необходимы современные глубоководные аппараты, оснащенные различной научно-исследовательской аппаратурой. Для успешного функционирования такого оборудования на предельных глубинах, до 6000 м и более, требуется высоконадежная система электропитания (СЭП) мощностью несколько десятков киловатт, обеспечивающая стабилизацию выходного напряжения на нагрузке в заданных пределах при высоких удельных характеристиках. Выполнение достаточно жестких требований к стабилизации напряжения на нагрузке и техническому исполнению СЭП неразрывно связано с особенностями построения силового канала передачи энергии по кабель-тросу переменного трехфазного напряжения повышенной частоты [1–9].

Таким образом, основываясь на результатах работ автора, изложенных в публикациях [10–16], предложен пример технической реализации СЭП телеуправляемого необитаемого аппарата с передачей энергии на переменном токе частотой 1000 Гц и мощностью 47 кВт.

Основным функциональным узлом в СЭП глубоководного телеуправляемого необитаемого под-

водного аппарата (ТНПА) является полупроводниковый инвертор, алгоритмы работы которого в значительной степени определяют энергетические характеристики силовых элементов: трансформаторов, фильтров, кабель-троса. В СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном трехфазном токе повышенной частоты целесообразно применять для управления транзисторными ключами автономного инвертора напряжения (АИН) векторную широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) с введением третьей гармоники [17–21].

Техническая реализация

Рассмотрим пример технической реализации СЭП глубоководного ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты (рис. 1) [15, 16]. Система состоит из бортовой части (БЧ), подводной части (ПЧ) и кабель-троса, по которому энергия передается от БЧ в ПЧ СЭП.

В свою очередь, БЧ СЭП ТНПА состоит из шкафа питания (ШП), блока преобразователя (БП), блока коммутации (БК) и пульта дистанционного управления (ПДУ). Подводная часть СЭП ТНПА состоит из СЭП гаража-заглубителя (СЭП ГЗ) и системы, располагающейся непосредственно на борту ТНПА (СЭП ТНПА) [15, 16].

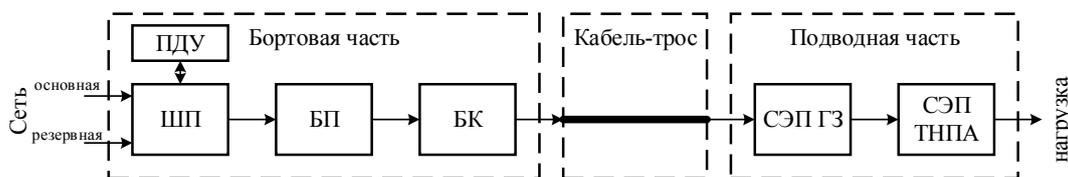


Рис. 1. Структурная схема СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты: ПДУ – пульт дистанционного управления; ШП – шкаф питания; БП – блок преобразователя; БК – блок коммутации; СЭП ГЗ – система электропитания гаража заглубителя; СЭП ТНПА – система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата

Энергоснабжение СЭП ТНПА осуществляется от основной или резервной бортовой сети (корабельной сети) трехфазного напряжения 380 В частотой 50 Гц. БЧ СЭП обеспечивает на выходе трехфазное напряжение частотой 1000 Гц для подачи в кабель-трос с линейным напряжением, не превышающим 1500 В при максимальной нагрузке в ПЧ, равной 47 кВт; стабилизацию напряжения на входе ПЧ в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения напряже-

ния с учетом падения напряжения на кабель-тросе при максимальной нагрузке; регулировку системы компенсации потерь в кабель-тросе при изменении сопротивления токопроводящей жилы в пределах от 0 до $R_{ж,ном}$, Ом; управление и информационный обмен в режиме дистанционного управления (ДУ) от пульта дистанционного управления (ПДУ); контроль выходного напряжения и сопротивления изоляции с индикацией и протоколированием данных.

Шкаф питания предназначен для питания БП постоянным выпрямленным напряжением сети 500 В. Структурная схема ШП представлена на рис. 2. ШП состоит из устройства контроля изоляции (УКИ); устройства питания (УП); устройства защиты и сопряжения (УЗиС); устройства управления контакторами (УУК); устройства сопряжения (УС). В стойке ШП, кроме перечисленных блоков, расположены сетевые контакторы КМ1, КМ2; предохранители FU; фильтр радиопомех ФРП; датчики тока ДТ1–ДТ3; токоограничитель КМ3; сетевой выпрямитель В1 с LC-фильтром Ф1; разъемы дистанционного управления и силовой связи с БП; интерфейсные разъемы; силовые клеммы подключения основной и резервной сети; клеммы заземления и контроля заземления; сенсорный монитор, органы

сигнализации и аварийного отключения; автоматические выключатели основной и резервной сети QF1, QF2.

Принцип работы ШП заключается в следующем: напряжение трехпроводной основной питающей сети через автоматический выключатель QF1 и контактор КМ1 подается на вход фильтра радиопомех ФРП, а также через QF1 напряжение основной сети поступает на блок трансформаторов и УП для формирования питающих напряжений собственных нужд БЧ СЭП ТНПА.

С выхода ФРП через датчики тока ДТ1–ДТ3 и токоограничивающие резисторы R1–R3 напряжение питающей сети поступает на выпрямитель В1 с фильтром Ф1. С выхода фильтра Ф1 выпрямленное напряжение поступает на вход БП.

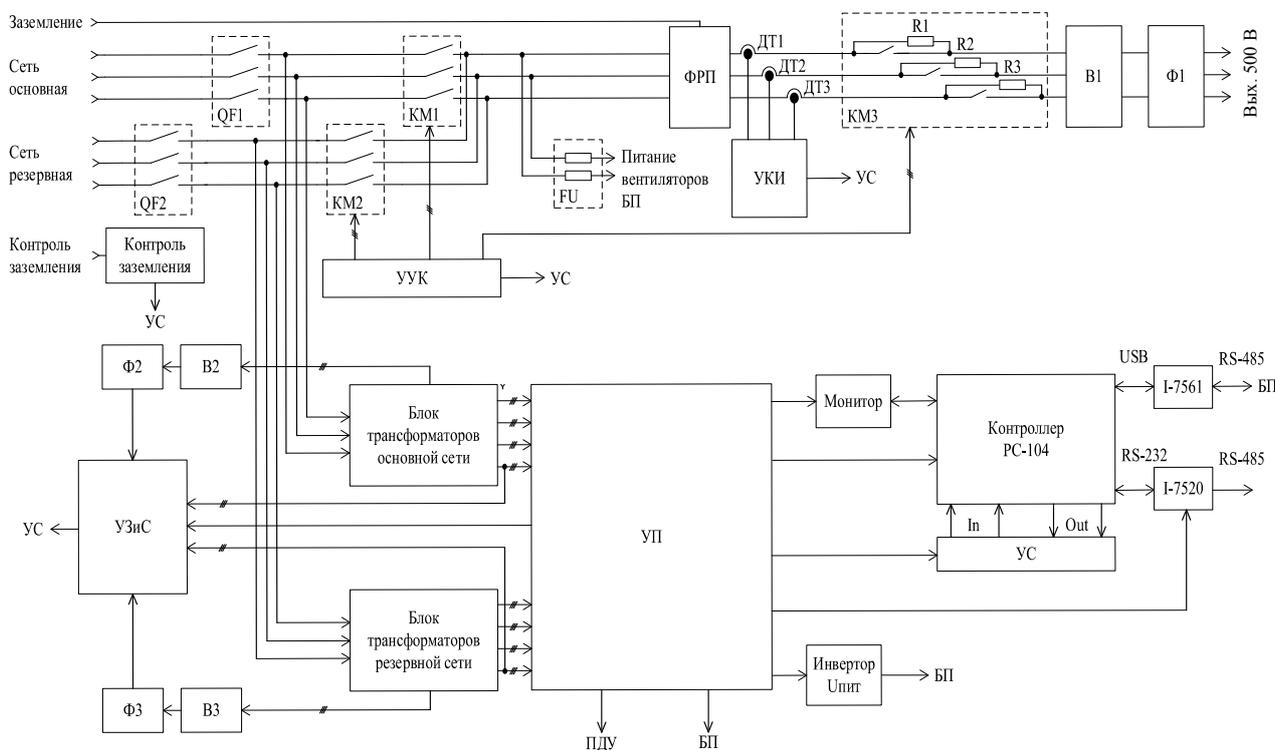


Рис. 2. Структурная схема шкафа питания бортовой части СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты

Задачу формирования переменного напряжения 1500 В повышенной частоты 1000 Гц выполняет трехфазный АИН, который входит в состав БП СЭП. Структурная схема БП СЭП глубоководного телеуправляемого необитаемого подводного аппарата представлена на рис. 3.

БП СЭП включает в себя входной фильтр Ф1; устройство контроля изоляции высокого напряжения (УКИ ВН); три модуля инвертора (МИ); блоки компенсации (БК); блок вентиляторов (БВ); устройство управления (УУ); устройство сопряжения (УС); устройство питания и защиты (УПиЗ); датчики тока ДТ1–ДТ6; датчик напряжения ДН; блок трансформаторов TV1–TV3.

Принцип работы БП СЭП заключается в следующем: постоянное напряжение 500 В поступает через входной фильтр Ф1 на три параллельно вклю-

ченные МИ. Каждый отдельно взятый модуль инвертора рассчитан на выходную мощность 10 кВт. Преобразованное трехфазное напряжение повышенной частоты (1000 Гц) через повышающие трансформаторы и блок компенсации поступает на выходные клеммы для подачи напряжения в кабель-трос и далее в СЭП подводной части.

Управление СЭП ТНПА осуществляется через интерфейс главного окна (рис. 4) посредством взаимодействия с сенсорным монитором. Контроллер (см. рис. 2) смонтирован на кросс-плате, в его состав входят процессорная плата MSM800SEV и адаптер дискретного ввода-вывода на 48 каналов ICOP-0101.

Контроллер конструктивно расположен в ШП бортовой части СЭП ТНПА. Передача данных осуществляется посредством пакетов (команды и теле-

метрия) с использованием измененного протокола WAKE.

Программное обеспечение контроллера СЭП ТНПА работает под управлением операционной си-

стемы Linux согласно алгоритму, представленному на рис. 5. Алгоритм работы контроллера СЭП ТНПА состоит из восьми последовательных алгоритмов функционирования системы.

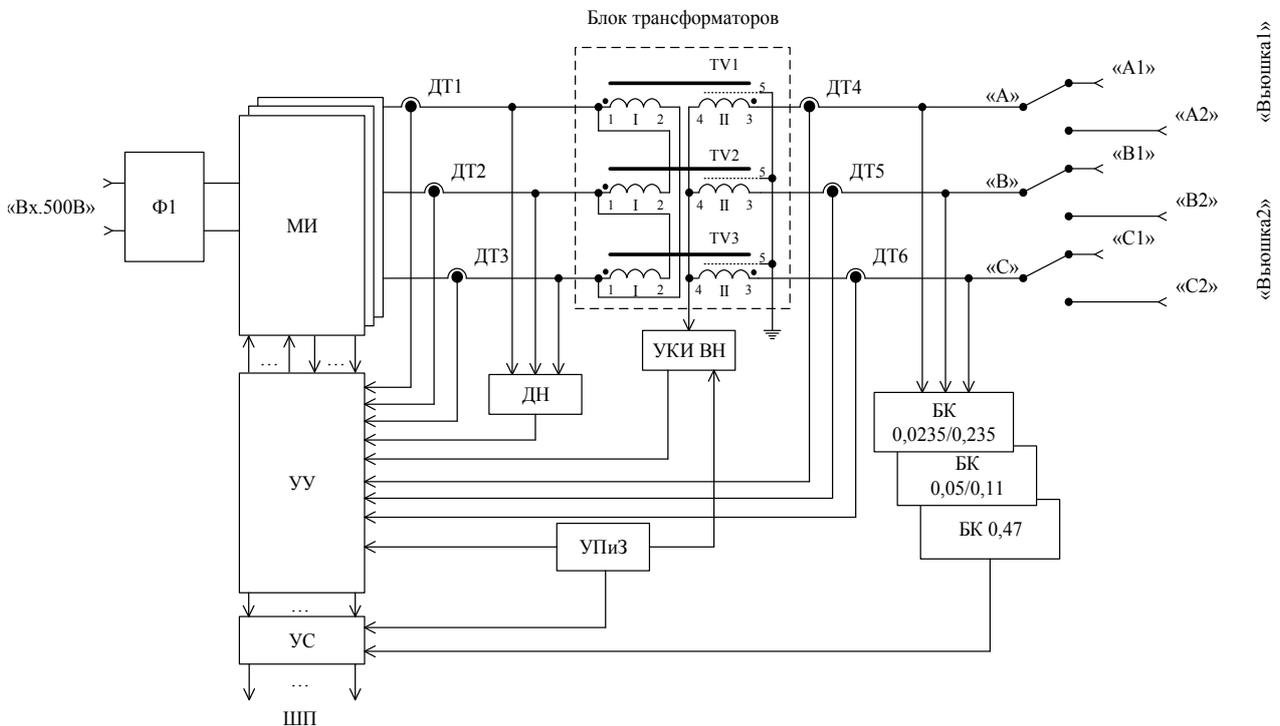


Рис. 3. Структурная схема блока преобразователя СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты: Ф1 – входной фильтр; МИ – модуль инвертора; УУ – устройство управления; УС – устройство сопряжения; ДТ1–ДТ6 – датчики тока; ДН – датчик напряжения; УКИ ВН – устройство контроля изоляции высокого напряжения; УПиЗ – устройство питания и защиты; БК 0,0235÷0,47 – блоки компенсации



Рис. 4. Интерфейс главного окна управления СЭП ТНПА

Алгоритм «КОНТРОЛЬ сети» реализует функцию контроля включения входных силовых автоматов СЭП ТНПА, а также проверку питающей основ-

ной или резервной трехфазной сети – обрыв фазы, уход частоты, превышение/уменьшение питающего напряжения относительно номинального значения.

Алгоритм «ШТАТНЫЕ настройки» обеспечивает настройку установочных величин из энергонезависимой памяти контроллера для начала работы системы. Алгоритм «Резервирование сети» обеспечивает в автоматическом режиме переход работы СЭП ТНПА с основной питающей сети 380 В 50 Гц на резервную сеть.

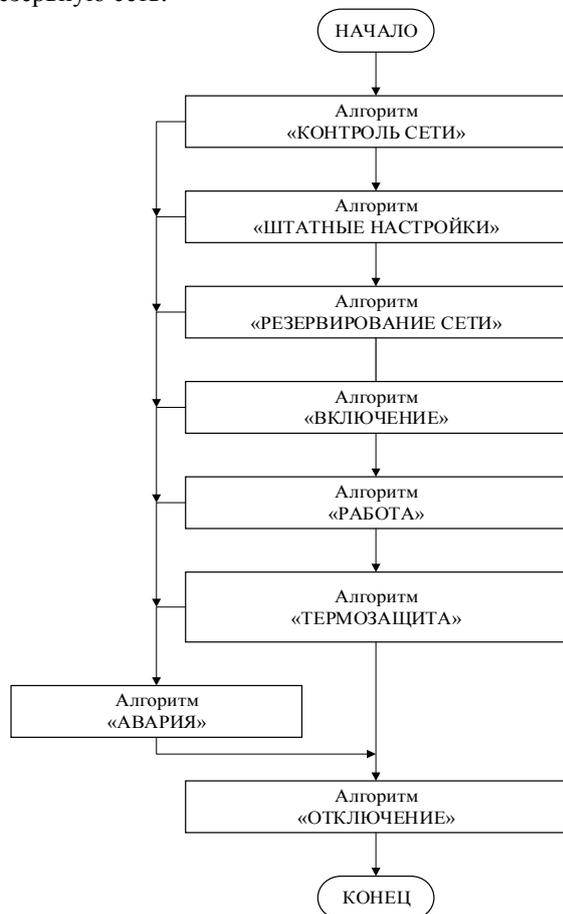


Рис. 5. Алгоритм работы контроллера СЭП ТНПА

На рис. 6 представлен алгоритм «ВКЛЮЧЕНИЕ» СЭП ТНПА. Работа алгоритма начинается с момента считывания информации сигналов с дискретных входов микроконтроллера.

По сигналам с пульта дистанционного управления (ПДУ) определяется режим работы СЭП ТНПА – автономный (АВТОНОМ.) или дистанционное управление (ДУ), при этом в «ГЛАВНОМ ОКНЕ» монитора подсвечивается соответствующий транспарант зеленым цветом. В режиме ДУ при нажатии кнопки включения основной сети «Вкл. осн.» в ПДУ происходит считывание сигнала «ДУ Вкл. осн.» и сигнал контактора КМ2, отвечающий за подключение резервной сети. Контакт КМ2 при работе от основной сети должен быть выключен, а вводной автомат QF1 включен, что обеспечит подачу команды на включение контакторов КМ1 и КМ3. При поступлении команды на включение в «ГЛАВНОМ ОКНЕ» (рис. 4) монитора подсвечивается зеленым цветом транспарант «Сеть осн. ВКЛ.». В случае несрабатывания контакторов КМ1, КМ2 и КМ3 в окне «Диагностика» загорается соответствующий транспарант красным цветом, выдается команда «Авария СЭП» в ПДУ с записью информации в протокол работы.

В режиме «АВТОНОМ.» алгоритм включения СЭП идентичен режиму ДУ за исключением того, что включение сети осуществляется от нажатия кнопки «Вкл.» в главном окне монитора. По завершению алгоритма «ВКЛЮЧЕНИЕ» СЭП ТНПА осуществляется переход к алгоритму «РАБОТА» (рис. 7, 8).

В режиме «АВТОНОМ.» алгоритм включения СЭП идентичен режиму ДУ за исключением того, что включение сети осуществляется от нажатия кнопки «Вкл.» в главном окне монитора. По завершению алгоритма «ВКЛЮЧЕНИЕ» СЭП ТНПА осуществляется переход к алгоритму «РАБОТА» (рис. 7, 8).

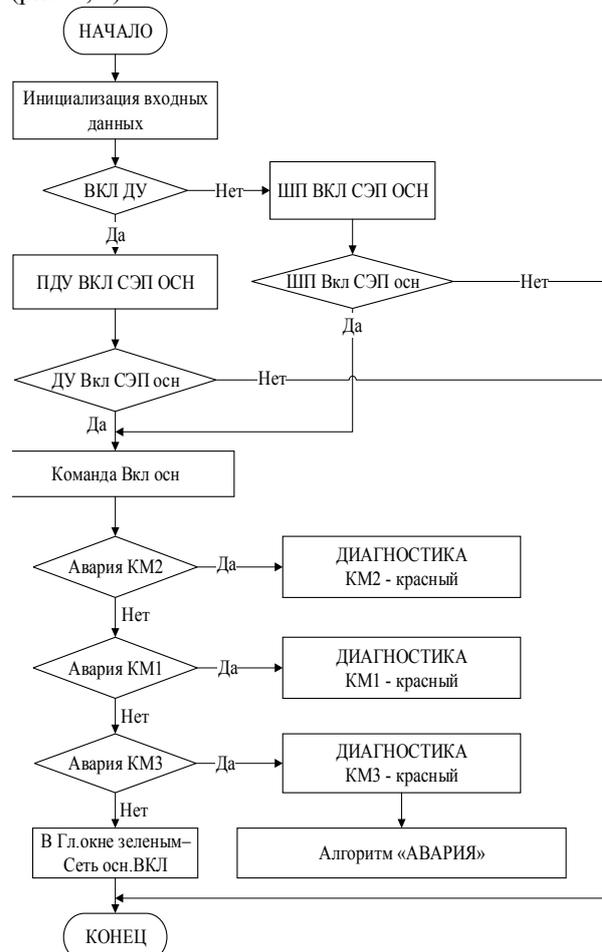


Рис. 6. Алгоритм «ВКЛЮЧЕНИЕ» СЭП ТНПА

Алгоритм «РАБОТА» СЭП ТНПА реализует следующие функции:

- обеспечение заданных 600 и 300 В выходных напряжений на нагрузках гаража-заглубителя и 600 и 300 В подводного аппарата;
- измерение сопротивления изоляции по двум шинам питания гаража-заглубителя и подводного аппарата в диапазоне от 80 до 400 кОм;
- измерение температуры внутрибоксового пространства СЭП гаража-заглубителя и подводного аппарата в диапазоне от минус 10 до +85 °С;
- передачу информации по каналу связи RS-485 и её запись в протокол работы.

При уменьшении выходного напряжения ниже 10% относительно номинального значения, а также сопротивлению изоляции в диапазоне 80–400 кОм в «ГЛАВНОМ ОКНЕ» монитора соответствующий транспарант загорается желтым цветом, чтобы пре-

дупредить оператора о нештатном состоянии работы, при этом блокировка функционирования СЭП ТНПА и запись значения в протокол не осуществляются.

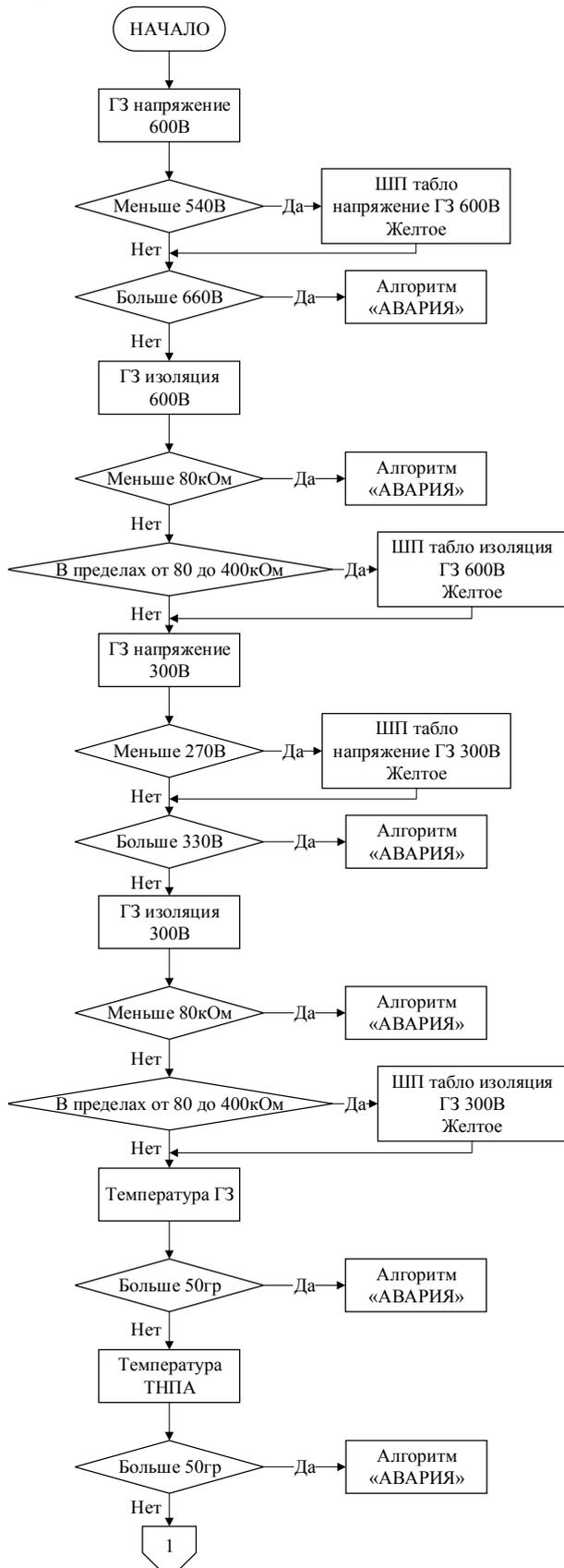


Рис. 7. Алгоритм «РАБОТА» СЭП ТНПА (часть 1)

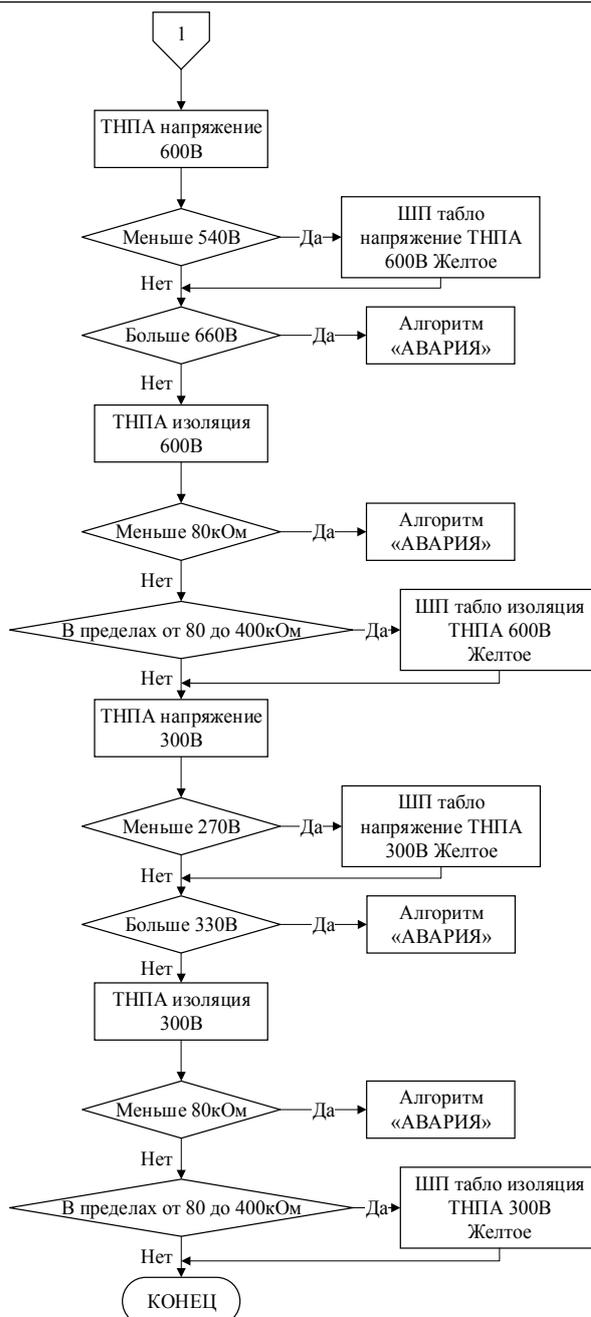


Рис. 8. Алгоритм «РАБОТА» СЭП ТНПА (часть 2)

В случае превышения выходного напряжения более 10% относительно номинального значения, сопротивления изоляции ниже или равного 80 кОм и температуры внутриблочного пространства более 50 °С выполняются алгоритмы «ТЕРМОЗАЩИТА» и «АВАРИЯ».

Алгоритм «ТЕРМОЗАЩИТА» обеспечивает контроль температуры нагрева блоков СЭП ТНПА и включение вентиляторов охлаждения при превышении допустимой температуры более 50 °С.

В случае возникновения нештатной ситуации запускается алгоритм «АВАРИЯ», который осуществляет автоматическую самопроверку СЭП ТНПА перед каждым включением, а также постоянный контроль (по прерыванию) данных системы и переход в алгоритм «ОТКЛЮЧЕНИЕ».

При алгоритме «ОТКЛЮЧЕНИЕ» СЭП ТНПА реализуется последовательное отключение системы от полезной нагрузки подводного аппарата и гаража-заглубителя.

Выводы

Таким образом, предложенная структурная схема СЭП ТНПА, ее техническая реализация и алгоритмы управления позволили обеспечить:

- стабилизацию напряжения на нагрузке в требуемых пределах $\pm 10\%$ от номинального значения при длине кабель-троса до 6000 м;
- удельные характеристики системы электропитания подводной части не менее 2,5 Вт/кг, что сопоставимо с мировыми показателями;
- согласованное функционирование всех элементов системы как в автономном, так и дистанционном режимах работы;
- безопасную и надежную работу подводного аппарата.

Литература

1. Подводные аппараты для геологических исследований / под ред. А.М. Игнатова. – Геленджик: ПО «Южморгеология», 1990. – 92 с.
2. Виноградов Н.И. Привязные подводные системы: Прикладные задачи статики и динамики / Н.И. Виноградов, М.Л. Гутман, И.Г. Лев, М.З. Нисневич. – СПб.: СПбГУ, 2000. – 313 с.
3. Войтов Д.В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. – М.: МОРКНИГА, 2012. – 506 с.
4. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев и др. – Владивосток: ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН, 2018. – 368 с.
5. Зарубежные самоходные необитаемые морские аппараты / А.А. Тарасенко и др. – СПб.: АО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит», 2016. – 300 с.
6. Ястребов В.С. Системы управления подводных аппаратов роботов / В.С. Ястребов, А.М. Филатов. – М.: Наука, 1984. – 85 с.
7. Ястребов В.С. Телеуправляемые подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1985. – 232 с.
8. Электроэнергетические установки подводных аппаратов / В.С. Ястребов и др. – Л.: Судостроение, 1987. – 123 с.
9. Егоров В.И. Подводные буксируемые системы. – Л.: Судостроение, 1981. – 304 с.
10. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope (Article number 012098) / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.O. Kuleshova, E.B. Shandarova, S.M. Shandarov, Yu.Z. Vasilyeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, October 27–29, 2017. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2017. – Vol. 177 (1).
11. Voltage stabilizer in power supply of underwater vehicle (Article number 022018) / V.M. Rulevskiy, V.A. Chekh, Y.A. Shurygin, A.A. Pravikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, December 4–6. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – Vol. 327 (2).
12. Bukreev V.G. Power supply system model of remote processing equipment / V.G. Bukreev, E.B. Shandarova, V.M. Rulevskiy // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2018. – Vol. 329 (4). – P. 119–131.

13. Рулевский В.М. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов / В.М. Рулевский, Ю.Н. Дементьев, О.В. Бубнов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2004. – Т. 307, № 5. – С. 120–123.

14. Мишин В.Н. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов переменного тока мощностью свыше 10 кВт / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 107–110.

15. Мишин В.Н. Система электропитания универсального многоканального телеуправляемого необитаемого буксируемого комплекса / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.А. Тарасенко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 5. – С. 8–10.

16. Система электропитания глубоководного аппарата с высоковольтной передачей энергии постоянного тока по кабель-тросу / В.М. Рулевский, В.А. Чех, В.Г. Букреев, Р.В. Мещеряков // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 1 (195). – С. 155–167.

17. Чаплыгин Е.Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией: учеб. пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – 56 с.

18. Разработка и моделирование подводных технических средств с передачей энергии по кабель-тросу / В.Н. Мишин, В.М. Рулевский, А.В. Федоров и др. // Открытое образование. – 2011. – № 2-2. – С. 328–331.

19. Юдинцев А.Г. Система управления трёхфазным автономным инвертором с векторной широтно-импульсной модуляцией / А.Г. Юдинцев, В.М. Рулевский // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 5-1. – С. 168–173.

20. Рулевский В.М., Ляпунов Д.Ю. Математическое моделирование системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе в пакете MATLAB/Simulink // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=20930>, свободный (дата обращения: 26.08.2019).

21. Математическая модель системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе / А.А. Правикова, В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов, В.Г. Букреев // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 131–135.

Рулевский Виктор Михайлович

Канд. техн. наук, проректор по научной работе и инновациям Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9229-8611>
Тел.: +7-906-950-04-01
Эл. почта: rulevsky@niiiaem.tomsk.ru

Rulevskiy V.M.

Technical implementation and algorithmic support of power supply system for remote power consumer

The article presents the technical implementation and control algorithms of the power supply system of a remote-controlled unmanned underwater vehicle with the transmission of energy through a cable-rope with increased AC frequency, which

provide voltage stabilization at the load with the required accuracy.

Keywords: deep-sea vehicle, power supply system, autonomous voltage inverter, vector pulse-width modulation.
doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-128-134

References

1. *Podvodnye apparaty dlya geologicheskikh issledovaniy* [Underwater vehicles for geological applications]. Edited by A.M. Ignanov, Gelendzhik, Publishing office «Yuzhmoregologiya», 1990, 92 p.

2. Vinogradov N.I., Gutman M.L., Lev I.G., Nisnevich M.Z. *Privyaznye podvodnye sistemy: Prikladnye zadachy statiki i dinamiki* [Tethered underwater systems: Applied tasks in statistics and dynamics]. Saint Petersburg: SPBGU, 2000, 313 p.

3. Voitov D.V. *Teleupravlyaemye neobitaemye podvodnye apparaty* [Remote-controlled unmanned underwater vehicles]. – M.: MORKNIGA, 2012, 506 p.

4. Inzartsev A.V. et al. *Podvodnie roboto-tekhnicheskie kompleksi: sistemy, tekhnologii, primeneniye* [Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications]. Vladivostok, Marine Technologies Institute of Far-East Branch of Russian Academy of Sciences, 2018, 368 p.

5. Tarasenko A.A. et al. *Zarubezhnye samokhodnye neobitaemye morskoye apparaty* [International unmanned marine vehicles]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg marine construction bureau «Malakhit», 2016, 300 p.

6. Yastrebov V.S., Filatov A.M. *Sistemy upravleniya podvodnykh apparatov robotov* [Control systems for underwater robots]. M., Nauka, 1984, 85 p.

7. Yastrebov V.S. *Teleupravlyaemye podvodnye apparaty* [Remote-controlled underwater vehicles]. Leningrad, Sudostroenie, 1985, 232 p.

8. Yastrebov V.S. et al. *Elektroenergeticheskie ustanovki podvodnykh apparatov* [Energy systems for underwater vehicles]. Leningrad, Sudostroenie, 1987, 123 p.

9. Egorov V.I. *Podvodnie buksiruemye sistemy* [Underwater towed systems]. Leningrad, Sudostroenie, 1981, 304 p.

10. Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Kuleshova E.O., Shandarova E.B., Shandarov S.M., Vasilyeva Yu.Z. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope (Article number 012098). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, October 27–29, 2017, Tomsk, Institute of Physics Publishing, 2017, vol. 177 (1).*

11. Rulevskiy V.M., Chekh V.A., Shurygin Yu.A., Pravikova A.A. Voltage stabilizer in power supply of underwater vehicle (Article number 022018). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MEACS): proceedings, Tomsk, December 4–6, Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018, vol. 327 (2).*

12. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M.. Power supply system model of remote processing equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 2018, vol. 329 (4), pp. 119–131.*

13. Rulevskiy V.M., Dementiev Yu.N., Bubnov O.V. *Sistemy elektropitaniya teleupravlyaemykh podvodnykh apparatov* [Power supply systems for remote-controlled underwater vehicles]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2004, vol. 307, no. 5, pp. 120–123.*

14. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Yudinsev A.G. *Sistemy elektropitaniya teleupravlyaemykh apodvodnykh apparatov peremennogo toka moshnostiuy syshe 10kW* [Power supply

systems for AC remote-controlled underwater vehicles with a power exceeding 10 kW]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 107–110.*

15. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Tarasenko A.A. *Sistema elektropitaniya universalnogo teleupravlyaemogo neobitaemogo buksiruemogo kompleksa* [Power supply system for multi-purpose multi-channel remote-controlled unmanned towed complex]. *Electronics and electrical equipment of transport, 2014, no. 5, pp. 8–10.*

16. Rulevskiy V.M., Chekh V.A., Bukreev V.G., Meshcheryakov R.V. *Sistema elektropitaniya glubokovodnogo apparata s visokovoltnoy peredachei energii postoyannogo toka po kabel-trossu* [Power supply systems for deep-diving submersible with high-voltage DC transmission via cable-rope]. *Bulletin of the YuFU. Engineering Sciences, 2018, no. 1 (195), pp. 155–167.*

17. Chaplygin E.E. *Spektralnoye modelirovaniye preobrazovatelei s shyrotno-impulsnoy modulyatsiei: uchebnoye posobie* [Spectral modelling of converters with pulse-width modulation: Learning Guide]. Moscow, Publishing Office of Moscow Power Engineering Institute, 2009, 56 p.

18. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Fedorov A.V., Tselebrovskiy I.V., Shurygin Yu.A., Zaychenko T.N. *Razrabotka i modelirovaniye podvodnykh tekhnicheskikh sredstv s peredachei energii po kabel-trossu* [Development and modelling of underwater devices with energy transmission via cable-rope]. Scientific and practical journal «Open Education», 2011, no. 2-2, pp. 328–331.

19. Yuditsev A.G., Rulevskiy V.M.. *Sistema upravleniya trekhfaznyim avtonomnym invertorom s vektornoy shirotno-impulsnoy modulyatsiei* [Control system for three-phase inverter with pulse-width modulation]. Scientific magazine «Fundamental research », 2015, no. 5-1, pp. 168–173.

20. Rulevskiy V.V., Lyapunov D.Yu. *Matematicheskoye modelirovaniye sistemy elektropitaniya teleupravlyaemogo neobitaemogo podvodnogo apparata s peredachei energii po kabel-trossu na peremennom toke v pakete Matlab/Simulink* [Mathematical modelling of power supply system for remote-controlled unmanned underwater vehicle using energy transmission via cable-rope with AC in Matlab/Simulink package]. Digital scientific magazine «Modern problems of science and education», 2015, no. 2. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=20930> (accessed date: 08/26/2019).

21. Pravikova A.A., Rulevskiy V.M., Lyapunov D.Yu., Bukreev V.G.. *Matematicheskaya model sistemy elektropitaniya teleupravlyaemogo podvodnogo apparata s peredachei energii pokabel-trossu na peremennom toke* [Mathematical model of power supply system for remote-controlled underwater vehicle using energy transmission via cable-rope with AC]. Proceedings of TUSUR University, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 131–135.

Victor M. Rulevskiy

Candidate of Engineering, Vice-Rector for Research and Innovation, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9229-8611>
Phone: +7-906-950-04-01
Email: rulevsky@niiam.tomsk.ru

Требования к подготовке рукописей статей,

представляемых для публикации в журнале

«Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»

1. Электронный вариант статьи должен быть представлен в виде файла, названного по-русски фамилией первого автора, на дискете или диске в формате Word 2003. Предпочтительнее представить его по электронной почте.

2. Оригинал на бумажном носителе должен полностью соответствовать электронному варианту.

3. Статья должна иметь (в порядке следования): УДК; И.О. Фамилии авторов; заглавие; аннотация (не реферат); ключевые слова; основной текст статьи; список библиографий под подзаголовком «Литература»; сведения об авторах; далее на английском языке: Фамилии авторов И.О., заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова. Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, электронный адрес.

4. Текст статьи должен быть размещен в две колонки без принудительных переносов через один интервал шрифтом Times New Roman 10 кегля на одной стороне листа белой писчей бумаги формата А4, без помарок и вставок. Для облегчения форматирования прилагается **шаблон статьи**, который размещен на сайте: journal.tusur.ru. Размер статьи со всеми атрибутами должен быть, как правило, не более пяти страниц.

5. Одни и те же символы в тексте, формулах, таблицах и рисунках должны быть единообразными по написанию. Русские буквы и греческие символы набираются прямым шрифтом, а переменные, обозначенные латинскими – курсивом, кроме слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул.

6. Формулы должны быть набраны в формульном редакторе (MathType) программы Word. Русские буквы, греческие символы, математические знаки (+, –, ×, ∈, =, скобки, ...) и цифры всегда набираются прямым не жирным шрифтом, а переменные (и кривые на графиках), обозначенные латинскими буквами или цифрами – курсивом, кроме англ. слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул (const, input; $\sin x(t_1)$; U_{in} ; $I_{вх}$; T_z ; β_2 ; H_2O , Adobe Acrobat, Cisco и т.д.); векторные величины – жирным, прямо (не курсив) – A_1 , $M(f)$, β_x . Шаблоны для набора формул необходимо взять на сайте из шаблона статьи.

7. Все употребляемые обозначения и сокращения должны быть пояснены.

8. Единицы измерения физических величин должны соответствовать Международной системе единиц (СИ) и написаны по-русски через пробел (х, ГГц; 20 ГГц; Т, град; 7 °С). 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



