

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Доклады ТУСУР. 2019 • Том 22, № 1

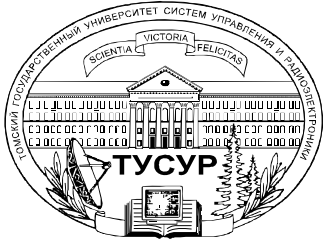
# ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники

2019 • Том 22, № 1



9 771818 044708 02007



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ  
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
2019, том 22, № 1**

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, 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. Шайдунов**, 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 ТУСУР, 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 25.03.2019.

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

---

**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

<b>Новиков А.В., Христенко А.В.</b> Дальность действия радиолокационных сенсоров охранных систем .....	7
<b>Сычев А.Н.</b> Анализ и синтез несимметричных связанных линий в однородной диэлектрической среде .....	11
<b>Данилина Т.И., Чистоедова И.А., Заречнев А.Д.</b> Время задержки сигнала в сверхбольших интегральных схемах .....	20
<b>Беличенко В.П., Запасной А.С., Якубов В.П., Мироньчев А.С.</b> Пространственная структура фазового состояния поля, порожденного системой близкорасположенных излучателей .....	25
<b>Беличенко В.П., Мироньчев А.С., Клоков А.В., Запасной А.С.</b> Моделирование резонансных полосковых зондов для интерференционной ближнепольной микроскопии .....	30

## УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

<b>Курносков К.В.</b> Методика оценки безопасности информационных систем, построенных с использованием технологий виртуализации .....	37
<b>Григорян Д.Р., Нги Н.В.</b> Влияние группы инерции S-блока на дифференциальную характеристику блочного шифра .....	45
<b>Евсютин О.О., Шелупанов А.А., Бабишин В.Д., Соседко К.А.</b> Непрерывная оптимизация с помощью гибридной модели клеточных автоматов и обучаемых автоматов .....	50
<b>Щерба Е.В., Литвинов Г.А., Щерба М.В.</b> Задача обеспечения качества обслуживания на базе протокола маршрутизации OLSR: подходы, алгоритмы, решения .....	55
<b>Мищенко Е.Ю., Соколов А.Н.</b> Алгоритмы реализации методов обезличивания персональных данных в распределенных информационных системах .....	66
<b>Нгуен А.Т., Кориков А.М.</b> Нейронные сети с полиномиальными кусочно-непрерывными функциями активации для поиска закономерностей в данных .....	71
<b>Ехлаков Ю.П.</b> Шаблоны бизнес-требований и требований пользователей к программному обеспечению производственно-технологического типа .....	77
<b>Чугунов Р.А., Кульневич А.Д., Аксенов С.В.</b> Методика построения карт глубины стереоизображения с помощью капсульной нейронной сети .....	83

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>Апасов В.И., Кобзев А.В., Михальченко Г.Я.</b> Исследование работы комбинированного понижающе-повышающего преобразователя для высоковольтной энергопреобразующей аппаратуры .....	89
<b>Брянцев А.А., Букреев В.Г.</b> Алгоритм определения параметров модели Шеферда для построения имитатора литий-ионного аккумулятора .....	95
<b>Требования</b> .....	100

---

**Contents**
**ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS**

<b>Novikov A.V., Khristenko A.V.</b> Radar range applied to guard surveillance systems .....	7
<b>Sychev A.N.</b> Analysis and synthesis of asymmetric coupled lines in a homogeneous dielectric medium .....	11
<b>Danilina T.I., Chistoyedova I.A., Zarechnev A.D.</b> Delay time of the signal in very-large integrated circuits .....	20
<b>Belichenko V.P., Zapasnoy A.S., Yakubov V.P., Mironchev A.S.</b> Spatial structure of the phase state of the field generated by a system of closely spaced radiators .....	25
<b>Belichenko V.P., Mironchev A.S., Klovov A.V., Zapasnoy A.S.</b> Simulation of resonant strip probes for interference near-field microscopy .....	30

**CONTROL, COMPUTER SCIENCE, AND INFORMATICS**

<b>Kurnosov K.V.</b> Methodology for assessing the security of information systems built using virtualization technologies .....	37
<b>Grigoryan D.R., Nghi N.V.</b> Influence of inertia group of the S-box on the differential characteristic of the box cipher .....	45
<b>Evsutin O.O., Shelupanov A.A., Babishin V.D., Sosedko K.A.</b> Continuous optimization using a hybrid model of cellular automata and learning automata .....	50
<b>Shcherba E.V., Litvinov G.A., Shcherba M.V.</b> Providing QoS based on the OLSR routing protocol: problems, algorithms and solutions .....	55
<b>Mishchenko E.Yu., Sokolov A.N.</b> Implementation algorithms for the methods of personal data depersonalization in distributed information systems .....	66
<b>Nguyen A.T., Korikov A.M.</b> Neural networks with polynomial piecewise-continuous activation functions for the problems of finding data patterns .....	71
<b>Ehlakov Y.P.</b> Business and user requirements patterns for engineering and manufacturing type software .....	77
<b>Chugunov R.A., Kulnevich A.D., Aksenov S.V.</b> Depth estimation based on convolutional neural networks .....	83

**ELECTRICAL ENGINEERING**

<b>Apasov V.I., Kobzev A.V., Mikhalcenko G.Ya.</b> Study of the combined buck-boost DC-DC converter in the composition of high-voltage energy-converting equipment .....	89
<b>Bryantsev A.A., Bukreev V.G.</b> Shepherd algorithm to determine model parameters when constructing simulator of the Lithium-Ion cells .....	95
<b>Manuscript requirements</b> .....	100

**ЭЛЕКТРОНИКА,  
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**



УДК 621.396.41

А.В. Новиков, А.В. Христенко

## Дальность действия радиолокационных сенсоров охранных систем

Рассмотрена методика расчета дальности действия радиолокационных сенсоров применительно к охранным системам. Показано, что при определенных условиях дальность действия имеет две грани: нижнюю, определяемую отраженным от подстилающей поверхности сигналом, и верхнюю, определяемую собственным шумом приемника. Получено соответствующее уравнение дальности, найдена область существования положительных корней и сделана оценка точности численного решения этого уравнения. Приведен пример расчета дальности действия радиолокационного сенсора MRS-1000.

**Ключевые слова:** уравнение дальности, дальность действия, радиолокационный сенсор, характеристика обнаружения, угловой отражатель, радиолокационный контраст, охранные системы.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-7-10

В настоящее время в связи с прогрессом техники прямого цифрового синтеза получили развитие радиолокационные системы охраны периметра, предназначенные для обнаружения, захвата и сопровождения подвижных целей [1–5]. Необходимость в таких системах возникает на потенциально опасных объектах, таких как аэропорты, объекты атомной и электроэнергетики, заводы хим. промышленности и т.п.

Первичным датчиком в охранных системах, как правило, является радиолокационный (РЛ) сенсор, выдающий координаты целей, причем для повышения информативности системы дополнительно комплектуются видеокамерами и тепловизорами, управление которыми ведется на основе информации от РЛ-сенсора.

РЛ-сенсор, как известно [6, 7], характеризуется дальностью действия (ДД), которая фактически определяется РЛ-контрастом  $\gamma$  между целью и помехой, под которой в данной работе будем понимать обратно рассеянный подстилающей поверхностью зондирующий сигнал, поступающий на вход приемника. В помеху включим и шум приемника.

РЛ-контраст, который определяется соотношением  $\gamma$  мощностей полезного сигнала и помехи, входит в *уравнение дальности*, которое имеет множество форм [7].

Уравнение дальности для свободного пространства записывается в виде

$$D^4 = \frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 \gamma P_{\text{п}}} \sigma_{\text{ц}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{и}}$  – мощность излученного сигнала;  $G$  – коэффициент усиления приемопередающей антенны;  $\lambda$  – длина волны излученного сигнала;  $\sigma_{\text{ц}}$  – эффективная поверхность обратного рассеяния цели (ЭПР);  $P_{\text{п}}$  – мощность помехи.

Мощность помехи определяется суммой фоновой и шумовой компоненты

$$P_{\text{п}} = P_{\text{ф}} + P_{\text{ш}}, \quad (2)$$

где индексом «ф» отмечена мощность фона, т.е. мощность сигнала, обратно рассеянного подстилающей поверхностью; индексом «ш» обозначена мощность шума приемника.

Будем считать, что цель – точечная, т.е. целиком лежит внутри элемента разрешения РЛ-сенсора.

Сценарий работы охранных систем предполагает достаточное возвышение сенсора над охраняемой областью (на десятки метров). В связи с этим уместно рассмотреть модель статистически изотропной и однородной шероховатой подстилающей поверхности. Тогда мощность фоновой составляющей будет определяться не только удельной ЭПР подстилающей поверхности, но и углом облучения, который в свою очередь зависит от высоты установки сенсора  $H$  и текущей дальности  $D$  (рис. 1) [8].

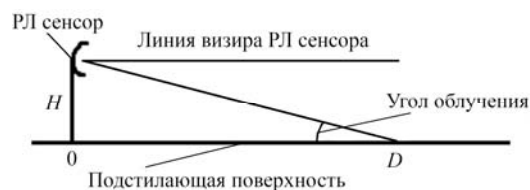


Рис. 1. Схема расположения РЛ-сенсора

Для вышеопределенной модели подстилающей поверхности зависимость ЭПР-элемента разрешения сенсора от высоты и дальности следующая [6. С. 209]:

$$\sigma_{\text{ф}}(D) \sim \Delta\theta_{\text{аз}} \Delta D \frac{H^2}{D}, \quad D > H. \quad (3)$$

Здесь  $\Delta\theta_{\text{аз}}$  и  $\Delta D$  – элемент разрешения сенсора по азимуту и дальности соответственно.

Модель (3) приводит к тому, что мощность сигнала, обратно рассеянного подстилающей поверхностью, убывает пропорционально пятой степени дальности (рис. 2, около 15 дБ/октаву)

$$P_{\text{ф}} \sim \sigma_{\text{ф}}(D) \frac{1}{D^4} \sim \frac{H^2}{D^5}. \quad (4)$$

Несмотря на то, что зависимость (3) известна, обзор показал, что анализ уравнения дальности (1) с учетом (2)–(4) отсутствует.

Так как мощность отраженного от точечной цели сигнала убывает с ростом дальности пропорционально четвертой степени, а мощность фоновой компоненты – пятой, то для достаточно больших дальностей фоном можно пренебречь, а РЛ-контраст



при этом будет определяться собственным шумом приемника (отношением сигнал/шум) и монотонно снижаться с ростом дальности.

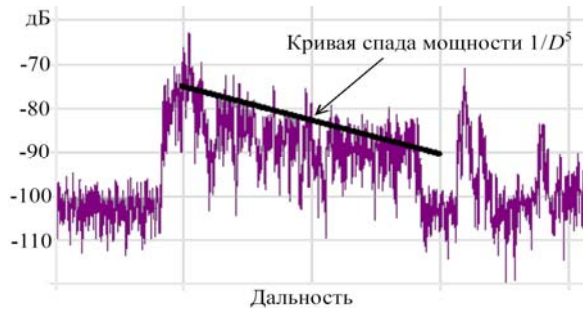


Рис. 2. Экспериментальная осциллограмма мощности обратно рассеянного асфальтированным участком (300 м) сигнала. Сенсор MRS-1000 X-диапазона

С другой стороны, для достаточно малых дальностей можно пренебречь шумом приемника, а РЛ-контраст при этом будет определяться фоном и монотонно снижаться, что важно, с уменьшением дальности. Налицо наличие такой дальности, для которой РЛ-контраст достигает максимума  $\gamma_{\max}$ . Поэтому, задавая некоторый РЛ-контраст, определяемый вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги, получим две дальности, если  $\gamma$  меньше  $\gamma_{\max}$ , или ни одной дальности, если  $\gamma$  превышает  $\gamma_{\max}$ . Если же  $\gamma = \gamma_{\max}$ , то получим единственную дальность, для которой обеспечивается требуемый РЛ-контраст. Две определенные таким образом дальности дают отрезок (зону действия РЛ-сенсора), на котором РЛ-контраст не хуже требуемого.

#### Определение дальности действия РЛ-сенсора

Запишем для некоторого контраста  $\gamma_1$  уравнение дальности (1), принимая во внимание (2)–(4)

$$D_1^4 = \frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 \gamma_1 (P_{\Phi 1} + P_{\text{ш}})} \sigma_{\text{ц}}, \quad (5)$$

где  $P_{\Phi 1} = K_1 / D_1^5$ ,  $K_1$  – коэффициент пропорциональности между мощностью фона и дальностью  $D_1$ .

Аналогично запишем уравнение (1) для некоторого контраста  $\gamma_2$

$$D_2^4 = \frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 \gamma_2 (P_{\Phi 2} + P_{\text{ш}})} \sigma_{\text{ц}}. \quad (6)$$

Здесь  $P_{\Phi 2} = K_2 / D_2^5$ .

Считая, что коэффициенты пропорциональности  $K_1$  и  $K_2$  равны, разделим (5) на (6)

$$(D_1/D_2)^4 = \frac{\gamma_2 (D_1/D_2)^5 + (P_{\text{ш}}/P_{\Phi 1})}{\gamma_1 (1 + (P_{\text{ш}}/P_{\Phi 1}))}. \quad (7)$$

Введем следующую замену переменных:

$$x = \frac{D_1}{D_2}, \quad \varepsilon = \frac{P_{\text{ш}}}{P_{\Phi 1}}, \quad q = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}, \quad (8)$$

тогда отношение (7) может быть переписано в виде алгебраического уравнения пятой степени относительно переменной  $x$

$$x^5 - q(1 + \varepsilon)x^4 + \varepsilon = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) и является уравнением дальности для рассматриваемого случая статистически однородной и изотропной шероховатой подстилающей поверхности.

Коэффициент  $q$  показывает, во сколько раз отличаются два РЛ-контраста. Первый контраст – это некоторый опорный контраст, который может быть получен, например, в результате обмера тестовой цели над заданной подстилающей поверхностью, а второй – требуемая величина РЛ-контраста, определяемая заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги.

Параметр  $\varepsilon$  определяет контраст шум–фон на некоторой опорной дальности  $D_1$ , и может быть определен, например, в результате измерений.

Путем анализа первой и второй производных уравнения (9), показано, что для некоторого  $\varepsilon$  существует (рис. 3) критическая величина  $q$

$$q_{\text{кр}}(\varepsilon) = \frac{5}{2(1 + \varepsilon)} \sqrt[5]{\frac{\varepsilon}{8}}, \quad (10)$$

при этом уравнение (9) при  $q < q_{\text{кр}}$  не имеет положительных корней; при  $q = q_{\text{кр}}$  имеет единственный положительный корень

$$x_e = \frac{4}{5} q(1 + \varepsilon), \quad (11)$$

а при  $q > q_{\text{кр}}$  – два положительных корня, один меньше  $x_e$ , другой больше  $x_e$ .

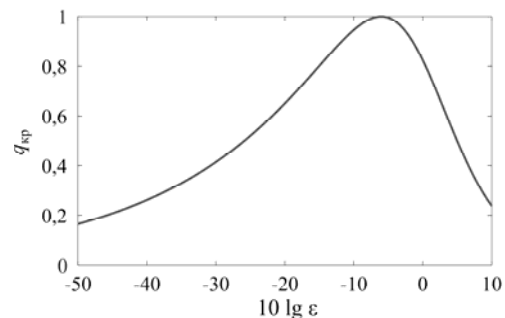


Рис. 3. Граница существования положительных корней уравнения дальности (9). Точке экстремума соответствует  $\varepsilon = 1/4$  (около -6 дБ)

Положительность отыскиваемых корней объясняется физическим смыслом переменной  $x$  в (8) – отношением дальностей.

Из рис. 3 следует, что если  $q > 1$ , то уравнение (9) при любых  $\varepsilon > 0$  будет иметь два положительных корня.

Если  $q < 1$ , то для существования зоны действия РЛ-сенсора должна найтись такая дальность, для которой контраст шум–фон не хуже определенной величины  $\varepsilon_{\text{кр}}$ . Эта величина может быть определена, например, по рис. 3 или решением трансцендентного уравнения (10) относительно  $\varepsilon$ . Например, (10) может быть решено методом простой итерации [9] при заданной величине  $q$

$$\varepsilon_{\text{кр}} \leftarrow 0,$$

$$\varepsilon_{\text{кр}} \leftarrow q^5 \frac{1}{5} \left( \frac{4}{5} \right)^4 (1 + \varepsilon_{\text{кр}})^5. \quad (12)$$

Формула (12) позволяет отыскать левый корень (на рис. 3 слева от экстремума  $\varepsilon=1/4$ ). Это соответствует ситуации, когда уровень фона выше уровня шума, что естественно при корректном измерении уровня фона.

Уравнение (9) решается численно методом простой итерации [9], после чего по (8) вычисляются две дальности, определяющие зону действия сенсора.

Показано, что начальные значения корней для метода простой итерации могут быть следующими:

$$x_1 \approx q(1+\varepsilon), \quad x_2 \approx \sqrt[4]{\varepsilon/q(1+\varepsilon)}, \quad (13)$$

при этом итерации должны быть выполнены по следующему алгоритму:

$$x_1 \leftarrow q(1+\varepsilon) - (\varepsilon/x_1^4), \quad (14)$$

$$x_2 \leftarrow \sqrt[4]{(x_2^5 + \varepsilon)/q(1+\varepsilon)}. \quad (15)$$

Показано, что если для (14) взять 50 итераций, а для (15) – 250, то относительная ошибка расчета корней не превысит  $10^{-5}$ , при этом максимум ошибки соответствует приближению коэффициента  $\varepsilon$  к критическому  $\varepsilon_{кр}$  слева.

#### Пример расчета дальности действия РЛ-сенсора MRS-1000

На основании результатов эксперимента, заключающегося в обмере углового отражателя (уголка) и человека на фоне некоторой подстилающей поверхности, по предложенной методике сделана оценка ДД-сенсора MRS-1000 [10, 11] (таблица).

Результат расчета ДД РЛ-сенсора MRS-1000  
X-диапазона

Тип цели, ее ЭПР	Расчетная зона действия, м
Человек, 0,8 м <sup>2</sup>	1000...2500
Уголок, 10 м <sup>2</sup>	50...6800

Вероятность правильного обнаружения – 0,8; вероятность ложной тревоги – 0,01; высота установки сенсора – 25 м; дальность  $D_1$  до измеряемых целей – 900 м.

Требуемое отношение сигнал/помеха рассчитывалось на основании [12–15]. При этом для цели типа «человек» использовалась модель сигнала со случайной начальной фазой и случайной амплитудой, распределенной по закону Рэлея. Для цели типа «уголок» использовалась модель сигнала со случайной начальной фазой и постоянной амплитудой.

Для цели типа «уголок» граница зоны действия, обусловленная фоном, равна 50 м (см. таблицу). Известно, что в ближней зоне антенны не работает закон четвертой степени дальности [16]. Для рассматриваемого сенсора граница ближней зоны равна 150 м, поэтому расчетную границу ДД сенсора 50 м следует скорректировать к 150 м. Учет ближней зоны антенны выходит за рамки данной работы, равно как и учет зоны действия формулы Введенского, когда в уравнении (1) вместо четвертой появляется восьмая степень дальности.

#### Выводы

Показано, что РЛ-сенсор охранной системы, возвышающийся над статистически изотропной и

однородной шероховатой поверхностью, имеет зону действия, нижняя граница которой определяется уровнем обратно рассеянного подстилающей поверхностью сигнала, а верхняя – уровнем собственного шума приемника.

Таким образом, при высотах расположения РЛ-сенсора, сравнимых с размерами (по дальности) зондируемой области подстилающей поверхности, не всегда близкое расположение цели обуславливает более надежное ее обнаружение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ, соглашение 14.577.21.0279 от 26.09.2017, идентификатор RFMEFI57717X0279.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику НИИ РТС ТУСУРа В.А. Хлусову за сделанные замечания и предложения, а также инженерам АО НПФ «Микран», в частности В.С. Малофиенко и А.С. Бондину, за помощь в подготовке и проведении эксперимента.

#### Литература

1. Wide-area Surveillance. Navtech Radar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://navtechradar.com/features/wide-area-surveillance/>, свободный (дата обращения: 24.01.2019).
2. Kelvin Huges Security Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kelvinhughes.com/security>, свободный (дата обращения: 24.01.2019).
3. Honeywell Integrated Security [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.honeywellintegrated.com/products/integrated-security/video/>, свободный (дата обращения: 24.01.2019).
4. White K. Radar sensor management for detection and tracking / K. White, J. Williams, P. Hoffensetz // Information Fusion 2008 11th International Conference on. – 2008. – P. 660–667.
5. Hennin S. Integrated Perimeter Security System / S. Hennin, G. Germana, L. Garcia // IEEE Conference on Technologies for Homeland Security. – 2007. – P. 70–75.
6. Радиотехнические системы: учеб. для вузов / под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
7. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника (Нью-Йорк, 1970); пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова: в 4 т. – Т. 1: Основы радиолокации / под ред. Я.С. Иццоки. – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.
8. Models of Land Clutter vs Grazing Angle, Spatial Distribution and Temporal Distribution – L-Band VV Polarisation Perspective [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/7ea5/f8cc618e36c72b3dc344e9c1a02bed6b0e98.pdf>, свободный (дата обращения: 24.01.2019).
9. Бахвалов Н.С. Численные методы: учеб. пособие для студентов физико-математ. специальностей вузов / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – 4-е изд. – М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2006. – 636 с.
10. Доценко В.В. Повышение энергетического потенциала РЛС с непрерывным ЛЧМ-сигналом / В.В. Доценко, М.В. Осипов, В.А. Хлусов // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 1(23). – С. 29–33.
11. Доценко В.В. Разработки аппаратуры радиолокации, приборостроения и электронной компонентной базы СВЧ: основные результаты выполнения комплексных про-

ектов НИИ систем электрической связи и АО «НПФ «Микран» / В.В. Доценко, Н.Д. Малютин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 79–85.

12. Computation of Rice and Noncentral Chi-Squared Probabilities. Technical Report PHS0254 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.phaselockedsystems.com/NoncentralChiSquared.pdf>, свободный (дата обращения: 24.01.2019).

13. Bocus M.Z. An Approximation of the First Order Marcum Q-Function with Application to Network Connectivity Analysis / M.Z. Bocus, C.P. Dettmann, J.P. Coon // IEEE Communications Letters. – 2013. – Vol. 17, № 3. – P. 499–502.

14. Andras Sz. The generalized Marcum Q-function: an orthogonal polynomial approach / Sz. Andras, A. Baricz, Y. Sun // Acta Univ. Sapientiae Math. – 2011. – Vol. 3, No 1. – P. 60–76.

15. Gil A. The Asymptotic and Numerical Inversion of the Marcum Q-Function / A. Gil, J. Segura, N.M. Temme // Stud. Appl. Math. – 2011. – Vol. 133, No 2. – P. 257–278.

16. Оценка границы дальней зоны линейной антенной решетки / В.И. Замятин, А.Ф. Шевченко // Системы обработки информации. – 2006. – № 1(50). – С. 55–64.

4. White K, Williams J, Hoffensetz P. Radar sensor management for detection and tracking. *Information Fusion 2008 11th International Conference on*, 2008, pp. 660–667.

5. Hennin S, Germana G, Garcia L. Integrated Perimeter Security System. *IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, 2007, pp. 70–75.

6. Grishin Yu.P., Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M., Kolomenskii Yu.A., Ul'anitskii Yu.D. *Radiotekhnicheskiye sistemy* [Radio Systems]. Moscow, High School Publ., 1990, 496 p.

7. Skolnik M. *Spravochnik po radiolokatsii* [Radar Handbook], New York, M., Sov. Radio Publ., 1976, 456 p.

8. Models of Land Clutter vs Grazing Angle, Spatial Distribution and Temporal Distribution – L-Band VV Polarisation Perspective. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/7ea5/f8cc618e36c72b3dc344e9c1a02bed6b0e98.pdf>, (accessed: January 24, 2019).

9. Bachvalov N.S., Gidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennye metody* [Numerical Methods], Moscow, Binom Publ., 2006, 636 p.

10. Docenko V.V., Osipov M.V., Hlusov V.A. *Povyshenie ehnergeticheskogo potentsiala RLS s nepreryvnym LCHM-signalom* [An Increase CW-LFM Radar Capacity], Proceedings of TUSUR University, 2011, no 1(23), pp. 29–33.

11. Docenko V.V., Malyutin N.D. *Razrabotki apparatury radiolokatsii, priborostroeniya i ehlektronnoj komponentnoj bazy SVCH: osnovnye rezul'taty vypolneniya kompleksnykh proektov NII Sistem ehlektricheskoy svyazi i AO «NPF «Mikran»* [Development of radar equipment, instrument-making and electronic component base of microwave: the main results of the implementation of complex projects of the Research Institute of Telecommunications Systems and «Micran» company], Proceedings of TUSUR University, 2017, no 3(20), pp. 79–85.

12. Computation of Rice and Noncentral Chi-Squared Probabilities. Technical Report PHS0254. Available at: <http://www.phaselockedsystems.com/NoncentralChiSquared.pdf>, (accessed: January 24, 2019).

13. Bocus M.Z., Dettmann C.P. An Approximation of the First Order Marcum Q-Function with Application to Network Connectivity Analysis. *IEEE Communications Letters*, 2013, vol. 17, no 3, pp. 499–502.

14. Andras Sz., Baricz A., Sun Y. The generalized Marcum Q-function: an orthogonal polynomial approach. *Acta Univ. Sapientiae Math*, 2011, vol. 3, no 1, pp. 60–76.

15. Gil A., Segura J., Temme N.M. The Asymptotic and Numerical Inversion of the Marcum Q-Function. *Stud. Appl. Math*, 2011, vol. 133, no 2, pp. 257–278.

16. Zamyatin V.I., Shevchenko A.F. *Ocenka granitsy dal'nei zoni lineynoy antennoj reshetki* [A Far Field Region of the Linear Array Estimation]. *Information Processing Systems*, 2006, no 1(50), pp. 55–64.

#### Новиков Анатолий Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. радиотехнических систем (РТС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-952-155-96-99  
Эл. почта: [anatolii.v.novikov@tusur.ru](mailto:anatolii.v.novikov@tusur.ru)

#### Христенко Алексей Викторович

Инженер АО «НПФ «Микран»  
Вершинина ул., 47, г. Томск, Россия, 634045  
Тел.: +7-906-949-66-73  
Эл. почта: [hristenko@micran.ru](mailto:hristenko@micran.ru)

Novikov A.V., Khristenko A.V.

#### Radar range applied to guard surveillance systems

A method to calculate the range of the radar sensor for security systems is considered. It is shown that in certain situations the range has two bounds: the lower, determined by signal backscattered by an underlying surface, and the upper, determined by the receiver noise. An appropriate 5th degree range equation is obtained and the area of existence of positive roots is found. An example of the radar range calculating is given.

**Keywords:** range equation, radar range, radar systems, detection and false-alarm probabilities, corner reflector, signal-to-noise ratio, signal-to-clutter ratio, guard surveillance system.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-7-10

#### References

1. Wide-area Surveillance. Navtech Radar. Available at: <https://navtechradar.com/features/wide-area-surveillance/> (accessed: January 24, 2019).

2. Kelvin Huges Security Systems. Available at: <https://www.kelvinhuges.com/security> (accessed: January 24, 2019).

3. Honeywell Integrated Security. Available at: <https://www.honeywellintegrated.com/products/integrated-security/video/> (accessed: January 24, 2019).

#### Anatolii V. Novikov

Candidate of Engineering, Assistant Professor,  
Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-155-96-99  
Email: [anatolii.v.novikov@tusur.ru](mailto:anatolii.v.novikov@tusur.ru)

#### Alexey V. Khristenko

Engineer, Department of Radar Systems, Micran 47, Vershinin st., Tomsk, Russia, 634045  
Phone: +7-906-949-66-73  
Email: [hristenko@micran.ru](mailto:hristenko@micran.ru)

УДК 621.372

А.Н. Сычев

## Анализ и синтез несимметричных связанных линий в однородной диэлектрической среде

Исследуются несимметричные связанные линии с однородным диэлектриком, которые являются основой для построения трансформирующего направленного ответвителя со слабой связью, квадратурного моста-делителя с двукратной трансформацией импеданса, а также трансформатора импеданса 1:4. Рассмотрены конструкции со слабой и сильной асимметрией, варианты подключения согласованных нагрузок, а также условия физической реализуемости. Представлены формулы расчета параметров линий, которым дана геометрическая интерпретация, позволившая ускорить и сделать наглядными их анализ и синтез. Для трех тестовых структур приведены частотные зависимости, а также расчетные параметры, включая погонные и модальные. Представленные формулы реализованы в компьютерной программе AsymH.

**Ключевые слова:** несимметричные связанные линии, однородный диэлектрик, погонные параметры, погонные емкости, погонные индуктивности, модальные параметры, характеристическое сопротивление, коэффициент связи, коэффициент симметрии.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-11-19

Связанные линии передачи (СЛ) широко используются в технике СВЧ. Исследованию СЛ и устройствам на их основе посвящено довольно много работ [1–15]. При этом несимметричные СЛ, имеющие свойство межлинейной трансформации импеданса, отсутствующее в симметричных СЛ, позволяют создавать согласующие цепи для СВЧ-транзисторов [8], квадратурные делители мощности, совмещенные с трансформаторами импеданса для мостовых устройств, включая балансные усилители [9], и т.п.

Несимметричные СЛ с однородным или почти однородным заполнением используются наиболее часто и описываются системой из четырёх независимых параметров, выбор которых определяется поставленной задачей [2].

Цель данной работы – представить различные системы параметров, полностью описывающих несимметричные связанные линии с однородным диэлектрическим заполнением, а также дать им геометрическую интерпретацию для упрощения и обеспечения наглядности процесса поиска проектного решения.

### Конструкции и схемы несимметричных связанных линий

Общие примеры конструкций несимметричных СЛ с однородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении показаны на рис. 1.

Различают линии со слабой и сильной межлинейной асимметрией. К слабо асимметричным можно отнести, в частности, несимметричные полосковые линии с проводниками различной ширины без диэлектрической подложки в однородной диэлектрической среде [2], показанные на рис. 1, а. К сильно асимметричным относятся СЛ с двойным экраном (рис. 1, б) [3], в которых одна из линий, например вторая, экранирует первую, лишая её собственной ёмкости на «землю». При идеальном двойном экранировании такие линии можно назвать полностью асимметричными или триаксиальными [16].

Заметим, что любые несимметричные СЛ с близкими постоянными распространения и обладающие свойством противонаправленности тоже можно отнести к линиям с эквивалентно-однородным диэлектрическим заполнением [1, 8, 9].

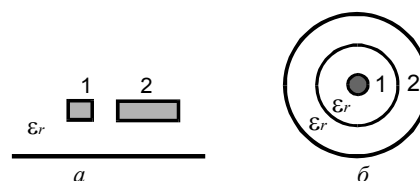


Рис. 1. Несимметричные связанные линии с однородным диэлектрическим заполнением  $\epsilon_r$ : а – линии со слабой асимметрией; б – линии с сильной асимметрией (с двойным экраном)

Схема нагруженного отрезка несимметричных СЛ длиной  $\ell$  и эквивалентные схемы бесконечно короткого отрезка  $\Delta x \rightarrow 0$  показаны на рис. 2.

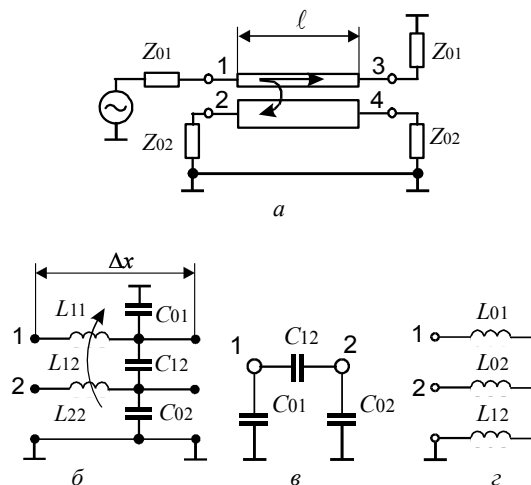


Рис. 2. Несимметричные связанные линии: а – схема произвольно нагруженного отрезка; б – эквивалентная схема бесконечно короткого отрезка; в – частичные ёмкости; г – частичные индуктивности

### Погонные параметры связанных линий

Исходными данными при электрическом анализе СЛ с однородным диэлектрическим заполнением (см. рис. 2) являются три независимых коэффициента, выбранных из матрицы погонных емкостей с воздушным заполнением ( $\varepsilon_r = 1$ ) [4]

$$\mathbf{C}(1) = \begin{bmatrix} C_{11}(1) & -C_{12}(1) \\ -C_{12}(1) & C_{22}(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{01}(1) + C_{12}(1) & -C_{12}(1) \\ -C_{12}(1) & C_{02}(1) + C_{12}(1) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $C_{11}(1)$ ,  $C_{22}(1)$  – собственные погонные емкости первой и второй линий соответственно;  $C_{01}(1)$ ,  $C_{02}(1)$ ,  $C_{12}(1)$  – собственные частичные и взаимная погонные емкости; а также относительная проницаемость реального диэлектрического заполнения  $\varepsilon_r$ . Итак, исходными данными являются всего четыре независимых параметра: или  $C_{01}(1)$ ,  $C_{02}(1)$ ,  $C_{12}(1)$ ,  $\varepsilon_r$ , или  $C_{11}(1)$ ,  $C_{22}(1)$ ,  $C_{12}(1)$ ,  $\varepsilon_r$ , или их комбинация. По известной матрице погонных емкостей СЛ с воздушным заполнением  $\mathbf{C}(1)$  можно найти матрицу погонных емкостей СЛ с реальным диэлектрическим заполнением  $\mathbf{C}$  по формуле

$$\mathbf{C} = \varepsilon_r \mathbf{C}(1), \text{ Ф/м} \quad (2)$$

и погонных индуктивностей  $\mathbf{L}$  по формуле [5]

$$\mathbf{L} = \varepsilon_0 \mu_0 \mathbf{C}(1)^{-1}, \text{ Гн/м}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6}$  Гн/м – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства.

Отсюда можно найти и такие параметры СЛ, как собственные импедансы первой и второй линий соответственно [9]

$$Z_1 = \sqrt{L_{11}/C_{11}} \text{ и } Z_2 = \sqrt{L_{22}/C_{22}}. \quad (4)$$

При этом фазовая скорость двух волн в линиях будет иметь только одно значение, определяемое величиной диэлектрической проницаемости среды  $\varepsilon_r$ :

$$v = c/\sqrt{\varepsilon_r} = 1/\sqrt{L_{11}C_{11}} = 1/\sqrt{L_{22}C_{22}}, \quad (5)$$

следовательно, будет справедливо ещё одно равенство

$$L_{11}C_{11} = L_{22}C_{22}. \quad (6)$$

Кроме того, численные значения коэффициентов емкостной и индуктивной связи линий в однородной диэлектрической среде тоже будут равны друг другу

$$k = k_C = k_L = \frac{|C_{12}|}{\sqrt{C_{11}C_{22}}} = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}}, \quad (7)$$

следовательно, значение коэффициента неуровновешенности емкостной и индуктивной связи будет равно нулю [5]

$$k_{LC} \equiv \delta = \frac{k_L - k_C}{1 - k_L k_C} = 0. \quad (8)$$

Исходя из (5)–(8), связанные линии передачи с однородным диэлектрическим заполнением обоснованно можно называть или синхронными [2] или с уравновешенной электромагнитной связью.

### Модальные параметры

Система модальных параметров отыскивается в результате модального анализа из решения алгебраической проблемы собственных значений [5]. В несимметричных СЛ распространяются в прямом и обратном направлениях по две нормальные волны, называемые синфазной ( $c$ ) и противофазной ( $\pi$ ).

Исходными данными для поиска модальных параметров являются матрицы погонных емкостей  $\mathbf{C}$  и индуктивностей  $\mathbf{L}$ . Для их произведения выполняется спектральное разложение, которое записывается так:

$$\mathbf{LC} = \mathbf{U} \text{diag}(1/v^2) \mathbf{U}^{-1} = \mathbf{U} \text{diag}(\varepsilon_r/c^2) \mathbf{U}^{-1}, \quad (9)$$

где  $c$  – скорость света в свободном пространстве;  $v$  – вектор, составленный из значений скоростей нормальных Т-волн – синфазной  $v_c$  и противофазной  $v_\pi$ ;  $\varepsilon_r$  – относительные диэлектрические проницаемости структур синфазного  $\varepsilon_{rc}$  и противофазного  $\varepsilon_{r\pi}$  возбуждений, соответственно. При этом в однородной среде модальные скорости нормальных Т-волн, а также диэлектрические проницаемости структур синфазного и противофазного возбуждений равны между собой

$$v = v_c = v_\pi; \quad (10)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{rc} = \varepsilon_{r\pi}. \quad (11)$$

Исходя из (10) и (11), видим, что решение для (9) не является уникальным и зависит от произвольно задаваемых нормирующих множителей. При этом  $\mathbf{U}$  – нормированная матрица модальных напряжений, составленная из собственных векторов матрицы произведения  $\mathbf{LC}$ , может быть записана как в [6]

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ R_c & R_\pi \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где  $R_c$ ,  $R_\pi$  – модальные числа, характеризующие отношения модальных напряжений в линиях. Так как  $\mathbf{U}$  имеет множество вариантов нормировки, то представим два наиболее важных из них.

Первый вариант, исследованный Кристалом (Cristal) [2], в котором модальные числа при обоих типах возбуждения равны по модулю [5]

$$R_c = -R_\pi = n = \sqrt{\frac{C_{11}}{C_{22}}} = \sqrt{\frac{L_{22}}{L_{11}}} = \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}, \quad (13)$$

где  $n$  – коэффициент трансформации (симметрии).

Второй, предложенный Специале (Speciale) [7] и названный им «конгруэнтным», в котором при синфазном возбуждении нормированные напряжения на обеих линиях равны единице, а при противофазном – отношению собственных частичных емкостей или индуктивностей линий [6]:

$$R_c = 1; R_\pi = -R_3 = -\frac{n-k}{1/n-k} = -\frac{C_{01}}{C_{02}} = -\frac{L_{02}}{L_{01}}. \quad (14)$$

При этом из условия физической реализуемости всегда должно выполняться двойное неравенство  $R_\pi \leq 0 < R_c$ . Записанные соотношения (13), (14) можно представить в виде геометрических чертежей, изображенных на рис. 3.

На рис. 3 геометрически показаны области допустимых значений для модальных чисел, обусловленные требованием физической реализуемости.

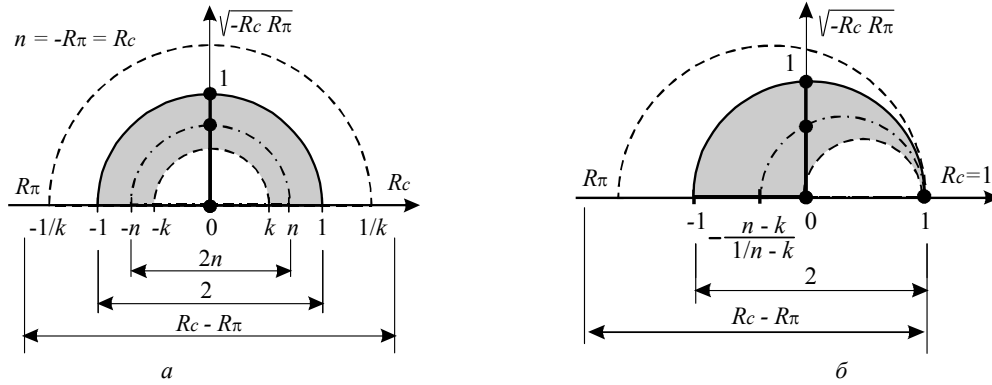


Рис. 3. Полуокружности отношений модальных напряжений в линиях ( $R_\pi \leq 0 < R_c$ ): *a* – модальные числа, равные по модулю  $n = -R_\pi = R_c$ ; *б* – модальные числа для конгруэнтного варианта в случае одинакового единичного напряжения на каждой из линий ( $R_c = 1$ ) в режиме синфазного возбуждения

Из полученных выше параметров (10)–(14) вычисляется матрица модальных токов **J** [6], коэффициенты которой в результате нормировки получают размерность проводимостей

$$\mathbf{J} = \mathbf{C}\mathbf{U}\text{diag}(v) = \mathbf{C}\mathbf{U}\text{diag}(c/\sqrt{\epsilon_r}) = \begin{bmatrix} Z_{c1}^{-1} & Z_{\pi 1}^{-1} \\ R_c Z_{c2}^{-1} & R_\pi Z_{\pi 2}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{c1}^{-1} & Z_{\pi 1}^{-1} \\ -(Z_{c1} R_\pi)^{-1} & -(Z_{\pi 1} R_c)^{-1} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где  $Z_{c1}$  – импеданс первой линии при синфазном возбуждении;  $Z_{\pi 1}$  – импеданс первой линии при противофазном возбуждении;  $Z_{c2}$  – импеданс второй линии при синфазном возбуждении;  $Z_{\pi 2}$  – импеданс второй линии при противофазном возбуждении. Так как матрица **J** определяется через **U**, то, опираясь на (12)–(15), отмечаем, что её элементы тоже не уникальны и имеют несколько вариантов представления, по крайней мере, два, соответствующих (13) и (14).

В первом варианте, когда  $R_c = -R_\pi = n$ , импедансы вычисляются по следующим формулам [5]:

$$Z_{c1} = \frac{Z_0}{n} \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} = Z_1 \frac{1+k}{k'} = Z_1 \frac{k'}{1-k}; \quad (16)$$

$$Z_{\pi 1} = \frac{Z_0}{n} \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} = Z_1 \frac{1-k}{k'} = Z_1 \frac{k'}{1+k}; \quad (17)$$

$$Z_{c2} = n Z_0 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} = Z_2 \frac{1+k}{k'} = Z_2 \frac{k'}{1-k}; \quad (18)$$

$$Z_{\pi 2} = n Z_0 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} = Z_2 \frac{1-k}{k'} = Z_2 \frac{k'}{1+k}, \quad (19)$$

где  $k' = \sqrt{1-k^2}$  – характеристический коэффициент;  $Z_0$  – характеристический импеданс СЛ, здесь выражаемый следующим образом:

$$Z_0 = Z_1 n = n \sqrt{Z_{c1} Z_{\pi 1}}; \quad (20)$$

$$Z_0 = Z_2 / n = n^{-1} \sqrt{Z_{c2} Z_{\pi 2}}. \quad (21)$$

Во втором конгруэнтном варианте [7], когда выполняются соотношения (14), получаем другие формулы модальных импедансов, при записи которых для их корректной идентификации изменим порядок следования индексов на обратный.

$$Z_{1c} = \frac{Z_0 k'}{n-k}; \quad Z_{1\pi} = \frac{Z_0}{k'} (1/n-k); \quad (22)$$

$$Z_{2c} = \frac{Z_0 k'}{1/n-k}; \quad Z_{2\pi} = \frac{Z_0}{k'} (n-k). \quad (23)$$

В случае симметричных СЛ, когда  $n = 1$ , предполагается  $R_c = 1, R_\pi = -1$ , при этом  $Z_{0e} = Z_{c1} = Z_{c2}$  и  $Z_{0o} = Z_{\pi 1} = Z_{\pi 2}$ .

Также важно отметить, что модальные импедансы  $Z_{c1}, Z_{\pi 1}, Z_{c2}, Z_{\pi 2}$  и модальные числа  $R_c, R_\pi$  всегда соотносятся следующим образом [6]:

$$-R_c R_\pi = \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} = \frac{Z_{\pi 2}}{Z_{\pi 1}}. \quad (24)$$

Далее с использованием матриц модальных напряжений **U** и токов **J**, однозначно определяются матрицы характеристических импедансов (волновых сопротивлений) **Z** и адмитансов (волновых проводимостей) **Y**, которые записываются:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{U}\mathbf{J}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{22} \end{bmatrix}, \text{ Ом}; \quad (25)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Z}^{-1} = \mathbf{J}\mathbf{U}^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} \\ -Y_{12} & Y_{22} \end{bmatrix}, \text{ См}, \quad (26)$$

где  $Z_{11}, Z_{22}, Z_{12}$  – собственные и взаимный характеристические импедансы;  $Y_{11}, Y_{22}, Y_{12}$  – собственные и взаимный характеристические адмитансы связанных линий, при этом  $Z_m = 1/Y_{12}$  – взаимный импеданс. Элементы этих матриц вычисляются по формулам

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{22} \end{bmatrix} = \frac{Z_0}{k'} \begin{bmatrix} 1/n & k \\ k & n \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} \\ -Y_{12} & Y_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_0 k'} \begin{bmatrix} n & -k \\ -k & 1/n \end{bmatrix}, \quad (28)$$

где  $Z_0$  – характеристический импеданс СЛ, отыскиваемый из следующих соотношений [6]:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{c2} Z_{\pi 1}} = \sqrt{Z_{c1} Z_{\pi 2}} = \sqrt{Z_{12} Z_m}; \quad (29)$$

$$Z_0 = \sqrt{-R_c R_\pi Z_{c1} Z_{\pi 1}} = \sqrt{Z_{c2} Z_{\pi 2} (-R_c R_\pi)^{-1}}. \quad (30)$$

Из (27) можно определить коэффициент импедансной связи  $k$  [5]

$$k = \frac{Z_{12}}{\sqrt{Z_{11} Z_{22}}} = \frac{Z_{c1} - Z_{\pi 1}}{Z_{c1} + Z_{\pi 1}} = \frac{Z_{c2} - Z_{\pi 2}}{Z_{c2} + Z_{\pi 2}}, \quad (31)$$

который при однородном диэлектрическом заполнении численно совпадает с коэффициентами индуктивной  $k_L$  и емкостной  $k_C$  связи (7).

Ранее упомянутый характеристический коэффициент  $k'$  можно вычислить по формуле [15]

$$k' = \sqrt{1 - k^2} = \frac{Z_0}{\sqrt{Z_{11}Z_{22}}}, \quad (32)$$

при этом будут полезны следующие соотношения

$$k^2 + k'^2 = \frac{Z_{12}^2 + Z_0^2}{Z_{11}Z_{22}} = 1; \quad (33)$$

$$Z_0 = k' \sqrt{Z_{11}Z_{22}}; \quad Z_{12} = k \sqrt{Z_{11}Z_{22}}. \quad (34)$$

Кроме вышеприведенных зависимостей также представляют интерес формулы для средних модальных импедансов  $Z_c$  и  $Z_\pi$ :

$$Z_c = \sqrt{Z_{11}Z_{22}} + Z_{12} = Z_0 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} = \sqrt{Z_{c1}Z_{\pi2}} \sqrt{\frac{1+k}{1-k}}; \quad (35)$$

$$Z_\pi = \sqrt{Z_{11}Z_{22}} - Z_{12} = Z_0 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} = \sqrt{Z_{c1}Z_{\pi2}} \sqrt{\frac{1-k}{1+k}}, \quad (36)$$

позволяющие дополнительно определить следующие величины:

$$\sqrt{Z_{11}Z_{22}} = (Z_c + Z_\pi)/2; \quad Z_{12} = (Z_c - Z_\pi)/2; \quad (37)$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_c Z_\pi}; \quad \frac{Z_c}{Z_\pi} = \frac{1+k}{1-k}; \quad (38)$$



Рис. 4. Геометрическое представление импедансных соотношений в несимметричных связанных линиях  $Z_{11} \neq Z_{22}$  (а); полуокружность среднего импеданса со вписанным треугольником для определения соотношений между параметрами линий и их модальными параметрами (б); две пересекающиеся полуокружности для определения соотношений между модальными и взаимными импедансами (в)

Теперь выполним математическое спектральное разложение матрицы волновых сопротивлений  $\mathbf{Z}$  (25) и запишем его следующим образом:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} Z_c & 0 \\ 0 & Z_\pi \end{bmatrix} \mathbf{V}^{-1}, \quad (40)$$

где  $Z_{(c,\pi)} = \frac{Z_0}{k'} \left[ \frac{n+n^{-1}}{2} \pm D \right]$  – модальные импедансы линий синфазного и противофазного возбуждений соответственно;  $D = \sqrt{\left[ \frac{(n-n^{-1})}{2} \right]^2 + k^2}$  – расчетный параметр;  $\mathbf{V}$  – матрица, составленная из собственных векторов матрицы  $\mathbf{Z}$ , записывается

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \alpha & -\alpha^{-1} \end{bmatrix}, \quad (41)$$

где  $\alpha = (k'Z_c/Z_0 + 1/n)/k$ .

**Характеристические нагрузки**

Рассмотрев общие параметры линий, перейдем к задаче их характеристического нагружения. Возьмем несимметричные СЛ с однородным диэлектриком, разрежем их поперёк, оставим, к примеру, левый полубесконечный отрезок и, отбросив правый, найдем для него схемы замещения (включая параметры), являющиеся полностью согласованными (неотражающими), т.е. характеристическими. Такие эквивалентные схемы должны быть построены на сосредоточенных резистивных элементах, но ими-

тировать полубесконечные СЛ и быть электрически неотличимы от них [15]. Существует две основные конфигурации искомых схем – П- и Т-образные, показанные на рис. 5, а, б.

Формулы для вычисления значений элементов согласованных нагрузок в виде П- и Т-образных схем, замещающих полубесконечный отрезок СЛ, записываются так, что в индексах важна их последовательность записи. Отсюда значения элементов цепи  $Z_{1c}, Z_{1\pi}, Z_{2c}, Z_{2\pi}$ , которые численно совпадают с конгруэнтными модальными импедансами (22), (23), надо отличать от ранее описанных модальных импедансов  $Z_{c1}, Z_{\pi1}, Z_{c2}, Z_{\pi2}$  (16)–(19), так как это другие величины. Хотя это не относится к взаимным импедансам  $Z_m$  и  $Z_{12}$ , которые идентичны, и элементам схем, и элементам характеристических матриц

$$\begin{aligned} Z_{1c} &= Z_0 k' / (n - k) = 1 / (v C_{01}); \\ Z_{2c} &= Z_0 k' / (1/n - k) = 1 / (v C_{02}); \\ Z_m &= Z_0 k' / k = 1 / (v C_{12}); \end{aligned} \quad (42)$$

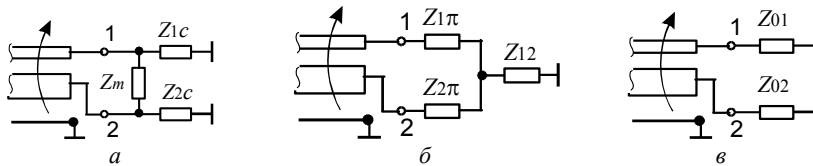
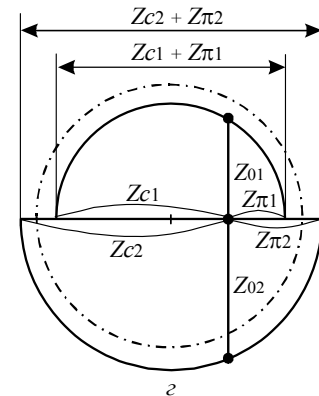


Рис. 5. Несимметричные связанные линии с оконечными согласованными нагрузками в виде П-образной (а) и Т-образной (б) схем, а также двух резисторов (в); геометрическое представление расчётных импедансов (г)



**Схемы включения отрезка связанных линий**

Схемы включения отрезка несимметричных связанных линий с однородным диэлектриком позволяют создавать следующие устройства, показанные на рис. 6: трансформирующий направленный ответвитель (НО) со слабой (менее 3 дБ) связью; квадратурный мост в качестве делителя мощности с трансформацией импеданса 1:2; трансформатор импеданса 1:4.

Эти три устройства были проанализированы в частотной области. Их расчетные частотные зависимости модуля  $[s_{ij} = 20 \log(|S_{ij}|)]$ , дБ и фазы  $[\varphi_{ij} = \arg(S_{ij})]$ , град основных коэффициентов  $S_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) матрицы рассеяния **S** показаны на рис. 7.

Электрическая длина отрезка СЛ для всех схем была выбрана одинаковой и составляла  $\theta = 90$  град на частоте  $f = 10$  ГГц. При этом  $\theta = \frac{\omega l}{v} = \frac{360 f \sqrt{\epsilon_r} l}{c}$ , где  $c$  – скорость света в свободном пространстве;  $l$  – геометрическая длина линий.

Основные параметры анализируемых устройств приводятся в табл. 1.

$$\begin{aligned} Z_{1\pi} &= Z_0 (1/n - k) / k' = v L_{01}; \\ Z_{2\pi} &= Z_0 (n - k) / k' = v L_{02}; \\ Z_{12} &= Z_0 k / k' = v L_{12}. \end{aligned} \quad (43)$$

Здесь выполняются следующие соотношения между значениями импедансов элементов нагрузок:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{1c} Z_{2\pi}} = \sqrt{Z_{1\pi} Z_{2c}} = \sqrt{Z_{12} Z_m}. \quad (44)$$

Особую важность для практики имеет предельно простая схема замещения в виде пары раздельных нагрузочных резисторов (рис. 5, в), расчётные номиналы которых вычисляются по следующим формулам:

$$Z_{01} = Z_0 / n; \quad Z_{02} = Z_0 n, \quad (45)$$

отсюда характеристический импеданс и коэффициент трансформации (симметрии) определяются так:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{01} Z_{02}}; \quad n = \sqrt{Z_{02} / Z_{01}}. \quad (46)$$

Геометрическое представление дополнительных расчетных соотношений (16)–(19) для этой схемы в случае, когда  $n = R_c = -R_\pi$ , дано на рис. 5, г [15].

Таблица 1

Параметры устройств на отрезке связанных линий		
№ п/п	Схема	Основные параметры
1	Трансформирующий НО со слабой связью	$Z_{01} = 75$ Ом; $Z_{02} = 50$ Ом; $Z_1 = 75$ Ом; $Z_2 = 50$ Ом; $C = 10$ дБ; $\theta = 90^\circ$
2	Квадратурный мост с трансформацией импеданса 1:2	$Z_{вх} = 50$ Ом; $Z_0 = 25$ Ом; $Z_1 = 35,4$ Ом; $Z_2 = 17,7$ Ом; $C = 3$ дБ; $\theta = 90^\circ$
3	Трансформатор импеданса 1:4	$Z_{вх} = 50$ Ом; $Z_{вых} = 12,5$ Ом; $Z_1 = 35,4$ Ом; $Z_2 = 17,7$ Ом; $C = 3$ дБ; $\theta = 90^\circ$

По первой схеме трансформирующего противонаправленного ответвителя (см. рис. 6, а), впервые исследованной в [2], можно сделать следующие выводы: при уровне связи 10–14 дБ ответвитель работает в двухоктавной полосе частот 4–16 ГГц (см. рис. 7, а); идеальное согласование наблюдается на всех портах и на всех частотах (поэтому эти характеристики не попадают в поле графика); каждая линия на входе и выходе имеет одинаковые нагрузки, при этом значения нагрузочных резисторов совпадают с характеристическими импедансами линий (первый – 75 Ом, второй – 50 Ом); разностный фа-



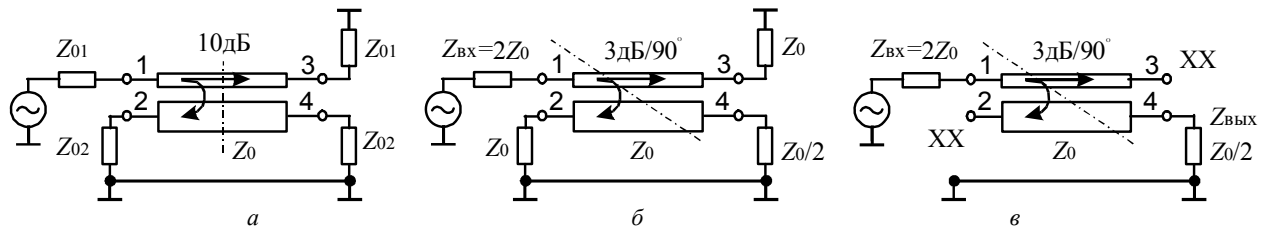


Рис. 6. Схемы включения отрезка несимметричных СЛ: *а* – трансформирующий направленный ответвитель со слабой связью; *б* – квадратурный мост-делитель мощности с трансформацией импеданса 1:2; *в* – трансформатор импеданса 1:4

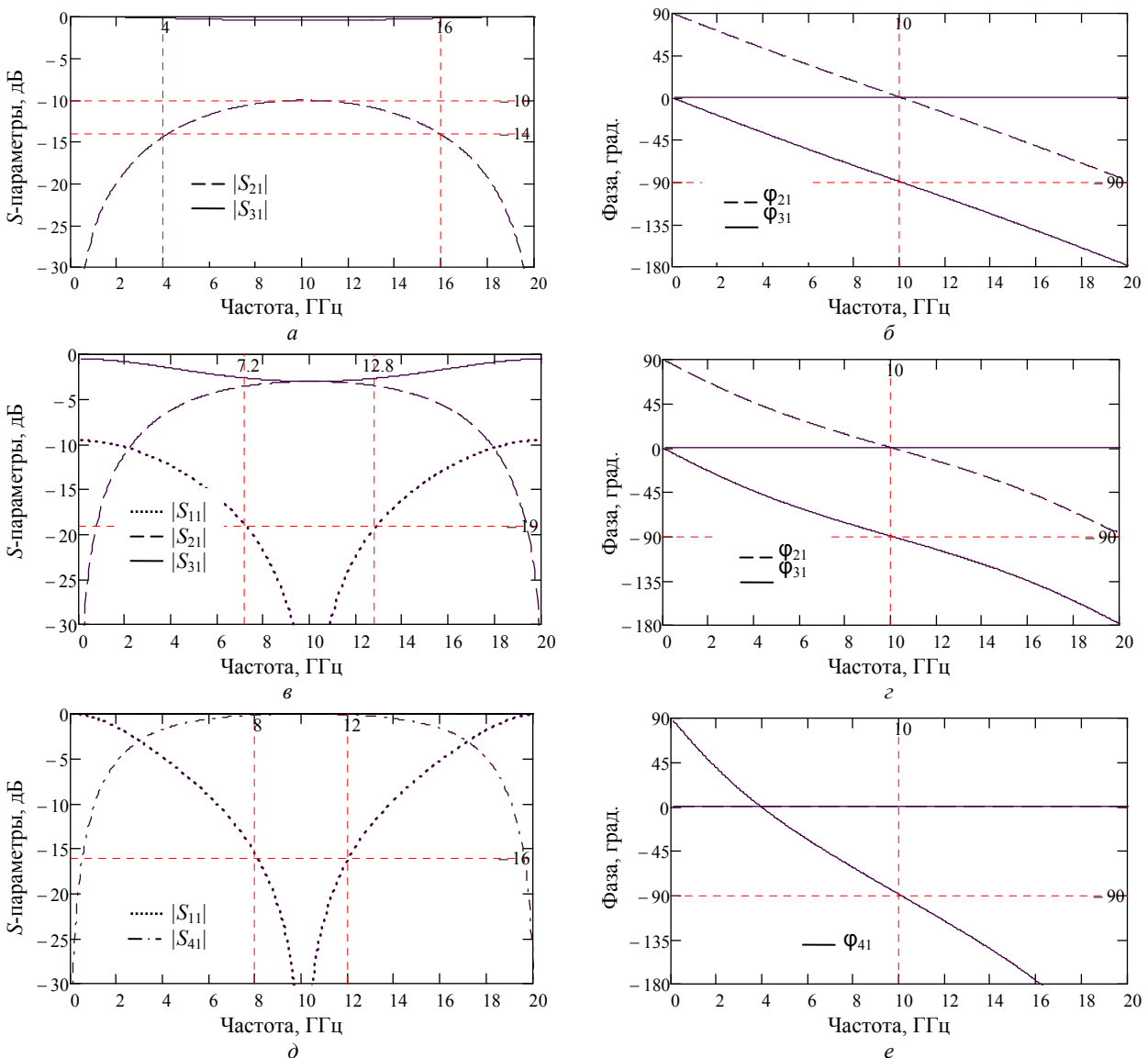


Рис. 7. Частотные характеристики трёх схем включения отрезка несимметричных СЛ:

*а, б* – модуль и фаза коэффициентов передачи  $S_{31}$  и связи  $S_{21}$  трансформирующего НО со слабой связью 10 дБ; *в, г* – модуль и фаза коэффициентов передачи  $S_{31}$ , связи  $S_{21}$  и отражения  $S_{11}$  (только модуль) квадратурного моста в качестве делителя мощности с трансформацией импеданса 1:2; *д, е* – модуль и фаза коэффициентов передачи  $S_{41}$  и отражения  $S_{11}$  (только модуль) схемы трансформатора импеданса 1:4

зовый сдвиг в выходных плечах составляет 90 град на всех частотах (т.е. ответвитель является квадратурным).

Вторая схема (рис. 6, *б*) – квадратурный мост в качестве делителя мощности с трансформацией импеданса 1:2 – была недавно предложена в [9]. Вход-

ной порт делителя имеет импеданс 50 Ом, второй и третий выходные порты – по 25 Ом, а к четвёртому порту подключена балластная нагрузка 12,5 Ом. Характеристическое сопротивление первой линии – 35,4 Ом, второй – 17,7 Ом. Связь между линиями – 3 дБ (см. рис. 7, *б*). Отличие от предыдущей схемы

заключается в том, что здесь используется различие импедансов не только первой и второй линий (поперечная трансформация), но и входных и выходных нагрузок (продольная трансформация). С уровнем входного согласования лучше 19 дБ полоса рабочих частот составляет 7,2–12,8 ГГц, т.е. 56%. Разность фаз в выходных портах – 90 град.

И, наконец, третья схема (см. рис 6, в), образуемая из предыдущей тем, что входной порт 50 Ом остаётся прежним, а на бывших ранее выходными 2-м и 3-м портах обеспечивается отражательный режим холостого хода (ХХ), хотя возможен и короткого замыкания (КЗ); при этом выходным становится 4-й порт с импедансом 12,5 Ом. Тем самым обеспечивается трансформация с четырёхкратным понижением импеданса с 50 до 12,5 Ом в полосе частот 40% (8–12 ГГц) при уровне согласования не хуже 16 дБ. На центральной частоте фазовая задержка составляет 90 град.

#### Условия физической реализуемости

Для системы из четырёх параметров, характеризующих несимметричные связанные линии в однородной среде, включающей значения диэлектрической проницаемости и трёх погонных емкостей, условия физической реализуемости формулируются весьма просто: значения всех частичных собственных и взаимных емкостей должны быть больше нуля, т.е.  $(C_{01}, C_{02}, C_{12}) > 0$ ; а значение относительной диэлектрической проницаемости среды должно превышать единицу  $\epsilon_r > 1$  (см. рис. 1).

Ещё одной удобной для расчёта является система, содержащая другие четыре параметра линий: характеристический импеданс  $Z_0$ , коэффициент импедансной связи  $k$ , коэффициент трансформации (симметрии)  $n$  и диэлектрическую проницаемость среды  $\epsilon_r$ . Заметим, что одновременно и произвольно все эти параметры задавать нельзя, поэтому необходимо сформулировать дополнительное условие физической реализуемости несимметричных СЛ. Начнём с характеристического импеданса, который обычно выбирается равным системному импедансу (как правило, 50 Ом). Коэффициент импедансной связи  $k$  можно задать любым в диапазоне [0–1]. Но вот коэффициент трансформации (симметрии)  $n$  ограничивается коэффициентом связи (см. рис. 3) и должен удовлетворять следующему условию физической реализуемости (любому из вариантов) [2]:

$$k \leq \min(n^{\pm 1}) \leq 1 \quad \text{или} \quad 1 \leq \max(n^{\pm 1}) \leq 1/k. \quad (47)$$

Отсюда видно, что только в структуре из симметричных связанных линий ( $n = 1$ ) в однородной диэлектрической среде коэффициент импедансной связи  $k$  можно задать произвольно в диапазоне [0; 1]. При этом величина связи  $k$  определяет максимально допустимый коэффициент межлинейной трансформации  $n$ , т.е. слишком большая связь не позволяет достигать большого коэффициента трансформации. Иначе, если требуется большой коэффициент трансформации (большая асимметрия), то необходимо снижать величину межлинейной связи. Например,

при желаемом коэффициенте трансформации (симметрии), равном  $n = \sqrt{2}$ , т.е. двукратном отношении характеристических импедансов линий, их коэффициент связи согласно (43) не должен превышать  $k = 1/\sqrt{2}$ , т.е.  $C = -20 \log(k) = 3$  дБ. Ещё пример, для достижения 10-кратного отношения межлинейных импедансов связь должна быть слабее  $k = 1/\sqrt{10}$  (10 дБ).

#### Синтез трансформирующего направленного ответвителя

Рассмотрим трансформирующий направленный ответвитель (см. рис. 6, а), построенный на отрезке несимметричных связанных линий с заданным коэффициентом связи  $k$ , однородным диэлектрическим заполнением  $\epsilon_r$  и нагруженный на концах первой и второй линий парами резисторов  $Z_{01}$  и  $Z_{02}$  соответственно. Требуется найти характеристический импеданс  $Z_0$  связанных линий, а также коэффициент трансформации импеданса (симметрии)  $n$ . Решение с использованием (20), (21), (45), (46) и (4) находится весьма просто в следующем виде:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{01} Z_{02}} = \sqrt{Z_1 Z_2}; \quad (48)$$

$$n = \sqrt{Z_{02} / Z_{01}} = \sqrt{Z_2 / Z_1}, \quad (49)$$

где  $Z_1 = \sqrt{L_{11} / C_{11}}$ ;  $Z_2 = \sqrt{L_{22} / C_{22}}$  – собственные импедансы первой и второй линий соответственно. Ещё раз заметим, что данный ответвитель идеально согласован во всех портах и на всех частотах. После проверки условия физической реализуемости (47) задачу можно считать окончательно решенной.

#### Синтез погонных параметров линий

Теперь решим задачу синтеза погонных параметров. Пусть несимметричные связанные линии в однородной диэлектрической среде изначально описываются величинами четырёх модальных параметров:  $Z_0, k, n, \epsilon_r$ , которые удовлетворяют условию физической реализуемости (47).

На основе данных модальных параметров СЛ синтезируются их погонные параметры (см. рис. 2) – матрицы погонных емкостей  $C$  и индуктивностей  $L$  – по следующим формулам соответственно:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & -C_{12} \\ -C_{12} & C_{22} \end{bmatrix} = \frac{\epsilon_0 \eta_0 \sqrt{\epsilon_r}}{Z_0 k'} \begin{bmatrix} n & -k \\ -k & 1/n \end{bmatrix}; \quad (50)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{12} & L_{22} \end{bmatrix} = \frac{\mu_0 Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}{\eta_0 k'} \begin{bmatrix} 1/n & k \\ k & n \end{bmatrix}, \quad (51)$$

где  $k' = \sqrt{1 - k^2}$ ;  $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \approx 376,7$  Ом – волновое сопротивление свободного пространства.

После синтеза электрических параметров СЛ осуществляется их конструктивная реализация, что является самостоятельной задачей.

В завершение представим три рассчитанные выше структуры связанных линий с полным списком их электрических параметров, которые сведём в табл. 2. Заметим, что первая структура имеет полосковую конструкцию [2], показанную на рис. 1, а.

Вторая и третья структуры могут быть исполнены с двойным экраном, как показано на рис. 1, б; при этом они имеют одинаковые импедансные параметры, но различающиеся диэлектрические проницаемости среды.

Таблица 2

## Численные значения параметров связанных линий

Группы параметров	Параметры	Значения параметров			
		Рис. 6, а [2]	Рис. 6, б	Рис. 6, в	
Погонные	$L_{11}$ , мкГн/м	0,264	0,275	0,368	
	$L_{12}$ , мкГн/м	0,068	0,137	0,183	
	$L_{22}$ , мкГн/м	0,176	0,139	0,185	
	$C_{11}$ , пФ/м	46,8	222	296	
	$C_{12}$ , пФ/м	18,1	219	292	
Модальные	$C_{22}$ , пФ/м	70,3	440	588	
	$C$ , дБ	10	3		
	$Z_0$ , Ом	61,24	25		
	$k$	0,3162	0,70		
	$n$	0,8165	0,71		
Модальные импедансы	$\epsilon_r$	1	2,8	5	
	$Z_c$ , Ом	84,9	59,5		
	$Z_{\pi_2}$ , Ом	44,1	10,5		
	$Z_{c1}$ , Ом	104,1	83,8		
	$Z_{c2}$ , Ом	69,4	42,3		
Импедансы линий	$Z_{\pi_1}$ , Ом	54,1	14,8		
	$Z_{\pi_2}$ , Ом	36,0	7,46		
	$Z_1$ , Ом	75	35,2		
	$Z_2$ , Ом	50	17,8		
	$Z_{11}$ , Ом	79,1	49,3		
Нагрузочные резисторы	$Z_{22}$ , Ом	52,7	24,9		
	$Z_{12}$ , Ом	20,4	24,5		
	$Z_{01}$ , Ом	75	50 / 25	50 / XX*	
	$Z_{02}$ , Ом	50	25 / 12,5	XX* / 12,5	
	$Z_{1c}$ , Ом	116	1785		
	$Z_{2c}$ , Ом	63,9	25,2		
	$Z_m$ , Ом	184	25,5		
	$Z_{1\pi}$ , Ом	58,6	24,8		
	$Z_{2\pi}$ , Ом	32,3	0,35		
$Z_{12}$ , Ом	20,4	24,5			

\* Режим холостого хода – разомкнутый конец линии.

### Заключение

Представлены различные системы параметров, полностью описывающие несимметричные связанные линии с однородным диэлектрическим заполнением. Подробно рассмотрены три схемы на таких линиях – трансформирующий направленный ответвитель со слабой связью, квадратурный мост-делитель с двукратной трансформацией импеданса и импедансный трансформатор 1:4. Системам параметров СЛ дана геометрическая интерпретация, которая позволила ускорить и сделать наглядными их анализ и синтез.

Приведенные в статье формулы реализованы в новой компьютерной программе АsumH, авторами которой являются студенты ТУСУРа В.А. Бондарь, К.Б.-Б. Дагба, Р.А. Калменов, А.И. Степанюга, а также автор данной статьи.

### Литература

1. Sorocki J. Broadband balun circuits composed of impedance transforming directional couplers and LH transmission-line sections / J. Sorocki, I. Piekarczyk, K. Staszek, P. Kaminski, K. Wincza, S. Gruszczynski // Int. Journal of Information and Electronics Engineering. – 2016. – Vol. 6, No. 3, May. – P. 147–150.
2. Cristall E.G. Coupled transmission-line directional couplers with coupled lines of unequal characteristic impedance // IEEE Trans. – 1966. – Vol. MTT-14, No. 7. – P. 337–346.
3. Фильтры и цепи СВЧ / Пер. с англ. Л.В. Алексеева, А.Е. Знаменского, В.С. Полякова. – М.: Связь, 1976. – 248 с.
4. Справочник по элементам полосковой техники / О.И. Мазепова, В.П. Мещанов, Н.И. Прохорова и др. / под ред. А.Л. Фельдштейна. – М.: Связь, 1979. – 336 с.
5. Mongia R., Bahl I.J., Bhartia P. RF and microwave coupled-line circuits. – Norwood: Artech House, 1999. – 520 p.
6. Tripathi V.K. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium // IEEE Trans. – 1975. – Vol. MTT-23, No. 9. – P. 734–739.
7. Speciale R. Even- and odd-mode for nonsymmetrical coupled lines in nonhomogeneous media // IEEE Trans. – 1975. – Vol. MTT-23, No. 11. – P. 897–908.
8. Abbasi M., Zirath H., Angelov I. Q-, V-, W-band power amplifiers utilizing coupled transmission lines for impedance matching // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. – 2008. – P. 863–866.
9. Wincza K. Asymmetric coupled-line directional couplers as impedance transformers in balanced and  $n$ -way power amplifiers / K. Wincza, S. Gruszczynski // IEEE Trans. – 2011. – Vol. MTT-59, No. 7. – P. 1803–1810.
10. Сычев А.Н. Синтез идеального фазового отношения для ответвителей на связанных линиях по заданному типу направленности / А.Н. Сычев, С.М. Стручков, Н.Ю. Рудый // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 15–18.
11. Сычев А.Н. Фазовращатель на основе транснаправленного ответвителя с развязкой по постоянному току ВЧ-тракта и цепи управления / А.Н. Сычев, Н.Ю. Рудый, И.М. Добуш, К.К. Жаров // Труды XIV Междунар. науч.-техн. конф. Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018): в 8 т. – Т. 4. – Новосибирск, 2018. – С. 158–161.
12. Сычев А.Н. Кроссоверы СВЧ на связанных линиях с полной связью // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 124–127.
13. Sychev A.N. Analog phase shifter of X-band implemented with novel trans-directional coupled-line coupler / A.N. Sychev, I.M. Dobush, N.Y. Rudyi, S.M. Struchkov // 21 European Microwave Week 2018. – Proc. of the 48-th Eur. Microwave Conf., Madrid, Spain. – Sep. 25–27, 2018. – P. 811–814.
14. Сычев А.Н. Моделирование неодинаковых связанных линий с лицевой связью / А.Н. Сычев, К.К. Жаров // Электронные средства и системы управления: матер. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф. (28–30 нояб. 2018 г.): в 2-х ч. – Ч. 1 – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 91–93 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://storage.tusur.ru/files/122116/2018-1.pdf> (дата обращения: 28.01.2019).
15. Сычев А.Н. Параметры несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком / А.Н. Сычев, Рудый Н.Ю. // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4-1. – С. 7–15. – doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-1-7-15
16. Триаксиальный кабель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Триаксиальный\\_кабель](https://ru.wikipedia.org/wiki/Триаксиальный_кабель) (дата обращения: 18.02.2019).

**Сычев Александр Николаевич**

Д-р техн. наук, профессор каф. компьютерных систем  
в управлении проектировании (КСУП)  
Томского государственного ун-та систем управления  
и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, 634050, Россия  
ORCID 0000-0002-4079-4605  
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17  
Эл. почта: ans@main.tusur.ru

Sychev A.N.

**Analysis and synthesis of asymmetric coupled lines in a homogeneous dielectric medium**

Asymmetric coupled lines with homogeneous dielectrics are studied, which are the basis for constructing of a transforming directional coupler with a weak coupling, a quadrature coupler divider with a double impedance transformation, as well as a 1:4 impedance transformer. Structures with weak and strong asymmetry, options for connecting matched loads, as well as conditions of physical implementation are considered. The formulas for calculating of the lines parameters, accompanied by geometric interpretation, are presented. Geometric approach allows us to speed up and make visual analysis and synthesis. For the three test structures, frequency dependencies are given, as well as design parameters, including per-unit-length ones and modal ones. The presented formulas are implemented in the «AsymH» computer program.

**Keywords:** asymmetric coupled lines, homogeneous dielectric, per-unit-length parameters, per-unit-length capacitances, per-unit-length inductances, modal parameters, characteristic impedance, coupling coefficient, symmetry coefficient.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-11-19

*References*

1. Sorocki J., Piekarz I., Staszek K. et. al. Broadband balun circuits composed of impedance transforming directional couplers and LH transmission-line sections, *Int. Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 3, May, 2016, pp. 147–150.
2. Cristall E.G. Coupled transmission-line directional couplers with coupled lines of unequal characteristic impedance, *IEEE Trans.*, 1966, vol. MTT-14, no. 7, pp. 337–346.
3. *Microwave filters and circuits*, Ed. A. Matsumoto, New York, London: Academic Press, 1970, 349 p.
4. *Handbook on components of stripline techniques*, Ed. Fel'dstein A.L., M.: Svyaz' Publ., 1979, 336 p. (in Russ.).
5. Mongia R., Bahl I.J., Bhartia P. *RF and microwave coupled-line circuits*, Norwood: Artech House, 1999. 520 p.
6. Tripathi V.K. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium, *IEEE Trans.*, 1975, vol. MTT-23, no. 9, Sept., pp. 734–739.

7. Speciale R. Even- and odd-mode for nonsymmetrical coupled lines in nonhomogeneous media, *IEEE Trans.*, 1975, vol. MTT-23, no. 11, pp. 897–908.

8. Abbasi M., Zirtah H., Angelov I., «Q-, V-, W-band power amplifiers utilizing coupled lines for impedance matching» in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, 2008, pp. 863–866.

9. Wincza K., Gruszczynski S. Asymmetric coupled-line directional couplers as impedance transformers in balanced and *n*-way power amplifiers, *IEEE Trans.*, 2011, vol. MTT-59, no. 7, pp. 1803–1810.

10. Sychev A.N., Struchkov S.M., Rudyi N.Yu. Synthesis of an ideal phase ratio for a coupled-line coupler with a given type of directionality, *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 15–18 (in Russ.).

11. Sychev A.N., Rudyi N.Y., Dobush I.M., Zharov K.K. «A phase shifter based on trans-directional coupler with DC isolation of RF-path and control circuit», in 2018 14<sup>th</sup> *Int. Sci.-Tech. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proc.* (APEIE–2018), in 8 vol., vol. 1, part 3, Novosibirsk, Oct. 2–6, 2018, pp. 380–383.

12. Sychev A.N. Microwave crossovers based on coupled line couplers, *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 124–127 (in Russ.).

13. Sychev A.N., Dobush I.M., Rudyi N.Y., et. al. Analog phase shifter of X-band implemented with novel trans-directional coupled-line coupler, 21 *European Microwave Week 2018, Proc. of the 48-th Eur. Microwave Conf.*, Madrid, Spain, Sep. 25–27, 2018, pp. 811–814.

14. Sychev A.N., Zharov K.K. Modeling of asymmetric broad-side coupled lines, *Electronic tools and control systems: Proc. of XIV Int. scientific-practical Conf.* (Nov. 28–30, 2018): in 2 part, part 1, Tomsk: V-Spectrum, 2018, pp. 91–93 (in Russ.). [Online] Available at: <https://storage.tusur.ru/files/122116/2018-1.pdf> (accessed: January 28, 2019)

15. Sychev A.N., Rudyi N.Y. Parameters of asymmetric coupled lines with inhomogeneous dielectrics, *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4-1, pp. 7–15 (in Russ.).

16. Triaxial cable [Online] Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Triaxial\\_cable](https://en.wikipedia.org/wiki/Triaxial_cable) (accessed: February 18, 2019).

**Aleksandr N. Sychev**

Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Department of Computer Systems, Tomsk State  
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia  
ORCID 0000-0002-4079-4605  
Phone: +7 (382-2) 41-47-17  
Email: ans@main.tusur.ru

УДК 621.377.2

Т.И. Данилина, И.А. Чистоедова, А.Д. Заречнев

## Время задержки сигнала в сверхбольших интегральных схемах

Предложена методика расчета времени задержки сигнала, позволяющая на основе результатов моделирования сопротивления, емкости и индуктивности металлизации в среде COMSOL Multiphysics прогнозировать величину задержки сигнала с учетом паразитных составляющих индуктивности и емкости металлизации. Установлено, что при уменьшении топологической нормы сверхбольших интегральных схем от 90 до 7 нм вклад индуктивной составляющей можно не учитывать.

**Ключевые слова:** металлизация СБИС, время задержки, модель, COMSOL.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-20-24

Развитие современного производства сверхбольших интегральных схем (СБИС) в основном направлено на увеличение степени интеграции элементов на кристалле и повышение быстродействия схем. Для продвижения данных направлений необходимо уменьшать все размеры элементов схемы и увеличивать число уровней металлизации, что приводит к возрастанию влияния паразитных емкостей и индуктивностей на время задержки сигнала [1–3].

С целью решения данной задачи было проведено моделирование сопротивления, емкости и индуктивности металлизации СБИС в среде COMSOL Multiphysics [4]. На основе результатов моделирования предложена методика расчета времени задержки сигнала в сверхбольших интегральных схемах.

С уменьшением размеров логических элементов их быстродействие возрастает, а быстродействие системы металлизации (глобальной и локальной) снижается из-за увеличения времени задержки сигнала.

Уменьшение размеров элементов СБИС подразумевает под собой одновременное уменьшение параметров металлизации: толщины, ширины и расстояние между элементами. Таким образом, необходим некоторый конструктивно-технологический параметр, который позволит учитывать эти изменения.

В качестве такого параметра выбрана топологическая норма, которая показывает минимальное расстояние между элементами схемы. При оценке металлизации топологическая норма диктует размеры металлизации.

На сегодня минимальные размеры первого (локального) уровня металлизации для СБИС представлены в международной технологической дорожной карте ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) [5].

В таблице представлены геометрические размеры только первого уровня металлизации и прогнозируемые для него значения задержки сигнала, согласно дорожной карте ITRS [1].

**Параметры первого уровня металлизации по ITRS-2015**

Топологическая норма, нм	90	65	45	32	22	16	10	7	
Число уровней	10	11	12	12	12	13	14	14	
Задержка сигнала, пс	370	409	626	966	2364	3864	8731	10938	
Первый уровень металлизации (M1)	Толщина ( $d$ ), нм	170	150	125	95	65	50	40	30
	Ширина ( $w$ ), нм	110	95	80	55	35	25	20	15
	Расстояние между проводниками ( $t_{ox}$ ), нм	220	210	160	115	75	45	35	25
Диэлектрик	Толщина ( $h_{ox}$ ), нм	320	205	130	85	55	35	25	20

Из таблицы следует, что при уменьшении топологической нормы СБИС от 90 до 22 нм толщина металлизации, ширина и расстояние между металлизацией уменьшаются в два-три раза.

Современные интегральные схемы имеют многоуровневую систему металлизации. Уровень металлизации, который прилегает к полупроводниковой подложке, считается первым уровнем металлизации (локальный уровень), далее следуют межуровневая металлизация и глобальная разводка (рис. 1) [2].

Первый уровень металлизации, как видно из рис. 1, имеет наименьшие размеры, а далее поперечное сечение металлизации возрастает, что в свою очередь способствует уменьшению сопротивления металлизации и увеличению механической прочности СБИС. Все уровни металлизации разделены ди-

электрическими слоями. Самую малую толщину имеет диэлектрический слой первого уровня. В соответствии с таблицей при уменьшении топологической нормы толщина диэлектрического слоя уменьшается с 320 до 55 нм.

Для многоуровневых систем металлизации в дорожных картах ITRS с 2004 по 2015 г. прописаны параметры металлизации в зависимости от их уровня. Для топологической нормы 90 нм при переходе с первого по седьмой уровень толщина металлизации возрастает в 5,7 раза, а ширина и расстояние между проводниками увеличиваются в 5 раз, что в свою очередь приводит к уменьшению задержки сигнала в пределах отдельно взятого уровня, а суммарная задержка сигнала на глобальной металлизации увеличивается за счет роста числа уровней [6, 7].

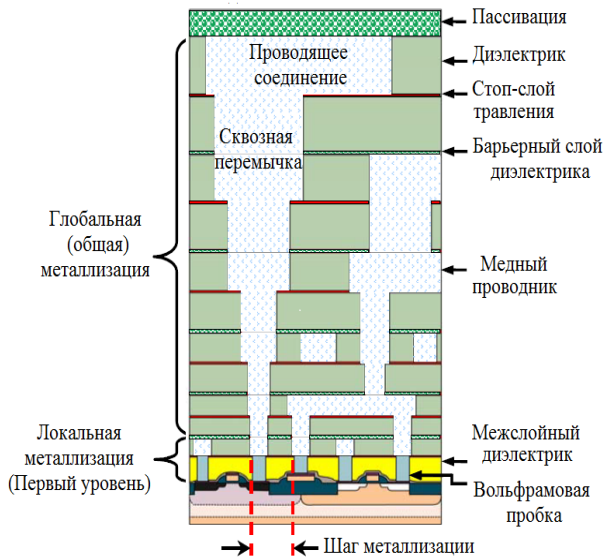


Рис. 1. Поперечное сечение СБИС с многоуровневой металлизацией на основе меди

### Объект и методика расчетов

Обычно при моделировании и проектировании системы металлизации СБИС считается, что металлизация представляет собой идеальные проводники, т.е. элементы, на которых не происходит задержки сигнала. Однако при рассмотрении реальной системы металлизации (см. рис. 1) необходимо учитывать вклад сопротивления, емкости и индуктивности элементов СБИС, а также их паразитные составляющие.

В качестве модели для расчета задержки сигнала выбрана трехмерная модель металлизации, представленная на рис. 2. Модель многоуровневой металлизации СБИС строилась в интегрированной среде моделирования COMSOL Multiphysics, которая включает в себя все этапы от создания геометрии, определения свойств материалов и описания физических явлений до настройки процессов решения и постобработки.

Основными компонентами емкостной составляющей задержки сигнала, как следует из рис. 2, являются:  $C_B$  – боковая емкость металлизации, т.е. емкость проводников, расположенных на расстоянии  $t_{OX}$ ;  $C_{II}$  – емкость между подложкой и первым уровнем металлизации и  $C_{MY}$  – емкость между уровнями, т.е. емкость между проводниками, расположенными на расстоянии  $h_{OX}$ .

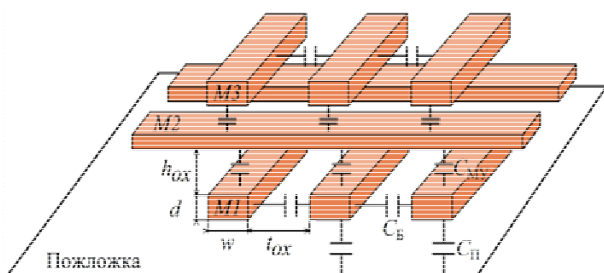


Рис. 2. 3D-структура многоуровневой металлизации СБИС и ее основные компоненты

Для моделирования емкости в COMSOL Multiphysics использовался модуль «Electrostatics». В основе методики расчета лежит закон Гаусса для электрического поля, при этом в качестве зависимой переменной используется скалярный электрический потенциал. Для проведения моделирования емкости металлизации необходимо задать два любых параллельных проводника, а также величину подаваемого электрического потенциала.

Емкость металлизации определяется как [8]

$$C = \frac{Q}{\iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}}, \quad (1)$$

где  $Q$  – заряд, Кл;  $\vec{E}$  – вектор электрического потенциала, В/м;  $d\vec{S}$  – замкнутая поверхность интегрирования, м<sup>2</sup>.

Замкнутая поверхность интегрирования  $d\vec{S}$  зависит от ширины и толщины металлизации.

На основе результатов моделирования суммарная емкость отдельно взятого уровня металлизации определялась по выражению

$$C_{\Sigma} = C_{II} + C_{MY} + 2 \cdot C_B. \quad (2)$$

В качестве исходных данных для моделирования емкости металлизации задавалась геометрия металлизации, т.е. толщина и ширина (см. таблицу), а также в зависимости от вида емкости  $C_B$ ,  $C_{II}$  или  $C_{MY}$  выбиралось расстояние между проводниками  $h_{OX}$  или  $t_{OX}$ . При моделировании длина металлизации составляла 1 мм, а величина подаваемого потенциала – 1 В.

Сопротивление металлизации моделировалось на основе модуля «Electric Currents», в решателе которого заложены уравнения сохранения заряда и закон Ома, при этом в качестве зависимой переменной используется скалярный электрический потенциал. Для работы модуля необходимо задать две параллельные грани металлизации, которые в свою очередь задают направление протекания тока величиной в 1 мкА и сечение (площадь) металлизации. При моделировании длина металлизации составляла 1 мм.

Для расчета сопротивления используется выражение

$$R = \frac{\rho_V \cdot l}{d \cdot w} = \rho_S \cdot \frac{l}{w}, \quad (3)$$

где  $\rho_V$  – удельное объемное сопротивление массивного материала, Ом·м;  $\rho_S$  – удельное поверхностное сопротивление металлизации, Ом/□.

При моделировании индуктивности применяется модуль «Charge Conservation». В основе решателя лежат уравнения Максвелла, а в качестве зависимой переменной выступают магнитно-векторный потенциал и вспомогательный скалярный электрический потенциал. Для моделирования индуктивности металлизации задавалась величина тока, равная 1 мкА, и определялись две параллельные грани металлизации, которые определяют сечение и направление

протекания тока. При моделировании индуктивности длина металлизации составляла 1 мм.

Индуктивность металлизации определяется по выражению [9]

$$L = \frac{\Phi_B}{I} = \frac{\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}}{I} \quad (4)$$

где  $\Phi_B$  – поток магнитной индукции, Вб;  $I$  – сила тока, А;  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции, Тл.

При рассмотрении металлизации СБИС в виде элементов  $LC$ -цепи, т.е. в случае, когда на металлизации нет потерь энергии, так как нет активного сопротивления, задержка сигнала определяется как [10]

$$\tau_{LC} = \sqrt{L \cdot C}, \quad (5)$$

где  $L$  – индуктивность, Гн;  $C$  – емкость металлизации, Ф.

Задержка сигнала на металлизации СБИС при рассмотрении  $RC$ -цепи рассчитывается по выражению [11]

$$\tau_{RC} = R \cdot C, \quad (6)$$

где  $R$  – сопротивление металлизации, Ом.

При рассмотрении реальной структуры многоуровневой металлизации СБИС необходимо одновременно учитывать вклад в задержку сигнала как  $LC$ -цепи, так и  $RC$ -цепи, в таком случае необходимо рассматривать  $RLC$ -цепь.

В первом приближении задержку сигнала на  $RLC$ -цепи возможно определить по выражению

$$\tau_{RLC} = \tau_{LC} + \tau_{RC}. \quad (7)$$

Более точное решение, согласно работам [12, 13], дает выражение

$$\tau_{RLC} = 1,047 \cdot \tau_{LC} + 1,4 \cdot \tau_{RC}. \quad (8)$$

Поправочные коэффициенты в выражении (8), получены методом подгонки теоретических кривых к практическим зависимостям задержки сигнала.

Из приведенной методики следует, что емкость, сопротивление и индуктивность металлизации фактически зависят от одних и тех же геометрических размеров металлизации.

#### Обсуждение результатов моделирования

В данной работе проводилось моделирование сопротивления, емкости и индуктивности металлизации в отдельности в зависимости от геометрических размеров металлизации, т.е. толщины, ширины, расстояния между проводниками и толщиной диэлектрического слоя.

Результаты моделирования сопротивления локального уровня металлизации от толщины представлены на рис. 3, который показывает, что при уменьшении толщины до 30 нм и менее наблюдается резкий рост сопротивления металлизации. В работах [14, 15] установлено, что в диапазоне толщин более 50 нм сопротивление медной металлизации слабо изменяется и составляет  $\sim 3$  мкОм·см. Результаты моделирования для этих же пленок практически совпадают с экспериментальными данными и позволяют установить значения критической толщины металлизации порядка 30 нм.

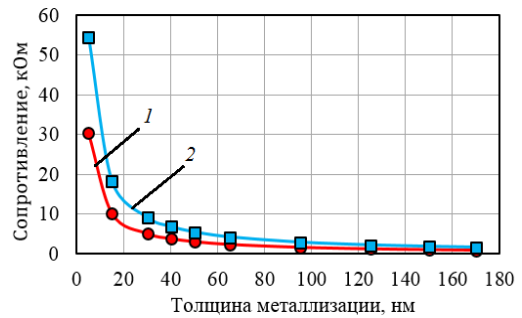


Рис. 3. Зависимость сопротивления локальной металлизации при ширине, равной 110 нм: 1 – моделирование; 2 – эксперимент

Моделирование емкости и индуктивности локальной металлизации проводилось при условии, что ширина металлизации равна 110 нм, расстояние между проводниками составляет 220 нм, а толщина диэлектрика – 320 нм, что соответствует топологической норме 90 нм. При фиксированных параметрах металлизации емкость между уровнями  $C_{МУ}$  и емкость между подложкой и первым уровнем металлизации  $C_{П}$  постоянна и равна 68 фФ.

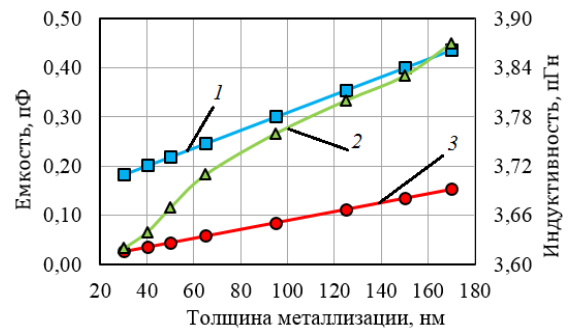


Рис. 4. Зависимость емкости и индуктивности локальной металлизации СБИС: 1 – суммарная емкость; 2 – индуктивность; 3 – боковая емкость

Рисунок 4 демонстрирует, что при уменьшении толщины металлизации от 170 до 30 нм индуктивность локальной металлизации увеличивается на 7%, боковая емкость уменьшается в 6 раз, а суммарная емкость уменьшается в 2 раза. Уменьшение индуктивной составляющей задержки сигнала связано с тем, что поперечное сечение проводника уменьшается и уменьшается величина магнитного потока, что приводит к уменьшению индуктивности.

С использованием результатов моделирования был выполнен расчет времени задержки сигнала от толщины металлизации (рис. 5).

Результаты моделирования показали, что при уменьшении толщины металлизации и фиксированной ширине наблюдается различие между задержками сигнала  $RC$ - и  $RLC$ -цепи за счет индуктивной составляющей в 2 раза.

Для учета влияния изменения всех размеров металлизации на задержку сигнала, необходимо рассматривать зависимости  $RC$ - и  $RLC$ -цепей от топологической нормы (рис. 6).

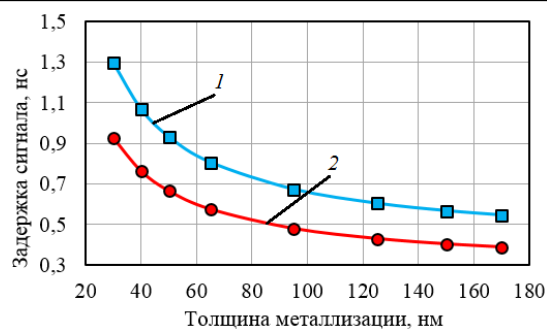


Рис. 5. Зависимость задержки сигнала на локальной металлизации от толщины: 1 – RLC-цепь; 2 – RC-цепь

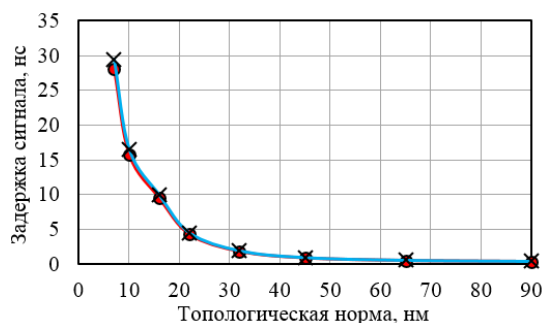


Рис. 6. Зависимость задержки сигнала на локальной металлизации от топологической нормы: ● – RC-цепь; × – RLC-цепь

При рассмотрении рис. 6 следует, что время задержки сигнала RC- и RLC-цепей на локальной металлизации обладает одинаковыми значениями. Таким образом, индуктивная составляющая задержки сигнала RLC-цепей мала и ее можно не учитывать, что позволяет прогнозировать время задержки сигнала по более простой модели RC-цепи.

### Заключение

При моделировании времени задержки сигнала на сверхбольших интегральных схемах было установлено, что при рассмотрении зависимостей задержки сигнала от топологической нормы, т.е. от совокупности всех геометрических размеров металлизации, влияние индуктивной составляющей в задержку сигнала мало и для прогнозирования величин задержки сигнала в сверхбольших интегральных схемах в первом приближении рекомендуется использовать модель RC-цепи.

### Литература

1. Saraswat K. Interconnect Scaling. – USA: Stanford. Dept. Elect. Eng., Stanford University, 2009. – 32 p.
2. Friedman G. On-Chip Interconnect: The Past, Present, and Future. – USA: Rochester NY. Dept. Elect. and Computer Eng., Rochester University, 2006. – 68 p.
3. Jaing Y. Modeling and Optimization of VLSI Interconnects. – USA: Nevada Las Vegas. Dep. Elect. and Computer Eng., University of Nevada Las Vegas, 2006. – 100 p.
4. COMSOL Multiphysics. – URL: <https://www.comsol.ru> (дата обращения: 20.07.2018).
5. The International Technology Roadmap for Semiconductors. – URL: <http://www.itrs2.net> (дата обращения: 20.07.2018).

6. Xhou G. A Delay Model for Interconnect Trees Based on ABCD Matrix / G. Xhou, L. Su, D. Jin. – China: Beijing. Dep. Elect. Eng., Tsinghua University, 2010. – 18 p.

7. Uma R. New modified Elmore delay model for resistance – capacitance – conductance (RCG) interconnect network scheme / R. Uma, I. Krishnappriya // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2013. – Vol. 54, No. 3. – P. 361–371.

8. Kumar A. Study the performance analysis of carbon nanotube as a VLSI interconnect. – Patiala: Thapar University, 2012 – 101 p. – URL: <http://hdl.handle.net/10266/1898> (дата обращения: 29.06.2018).

9. Ismail I. Effects of Inductance on the Propagation Delay and Repeater Insertion in VLSI Circuits: A Summary / I. Ismail, Eby G. Friedman // Circuits and Systems Society Outstanding Young Author Award. – 2002. – Vol. 8, No. 2. – P. 195–206.

10. Murgan T. Accurate Capture of Timing Parameters in Inductively – Coupled On-Chip Interconnects / T. Murgan, C. Schlachta, M. Petrov // SBCCI'04. – 2004. – P. 117–122.

11. Accurate A Priori Signal Integrity Estimation Using A Multilevel Dynamic Interconnect Model for Deep Submicron VLSI Design // Solid-State Circuits Conference, 2000. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/4157861\\_Ac\\_curate\\_a\\_priori\\_signal\\_integrity\\_estimation\\_sing\\_a\\_multileve\\_l\\_dynic\\_interconnect\\_model\\_for\\_deep\\_submicron\\_VLSI\\_de\\_sign](https://www.researchgate.net/publication/4157861_Ac_curate_a_priori_signal_integrity_estimation_sing_a_multileve_l_dynic_interconnect_model_for_deep_submicron_VLSI_de_sign) (accessed: July 15, 2018).

12. Abinash R. Effects of Coupling Capacitance and Inductance on Delay Uncertainty and Clock Skew / R. Abinash, M. Noha. – USA: Illinois Chicago. Dep. Elect. and Computer Eng., University of Illinois at Chicago, 2007. – P. 184–187.

13. Ramadass U. A Novel Interconnect Structure for Elmore Delay Model with Resistance – Capacitance – Conductance Scheme / U. Ramadass, Krishnappriya, J. Ponnian // American Journal of Appliad Sciences 10 (8). – 2013. – P. 881–892. – doi: 10.3844/ajassp.2013.881.892.

14. Данилина Т.И. Выбор толщины проводящих пленок для субмикронной металлизации / Т.И. Данилина, И.А. Чистоедова // Электронные средства и системы управления. – 2017. – №1 (1). – С. 95–97.

15. Danilina T.I. Selection of conductive film thickness for submicron metallization / T.I. Danilina, I.A. Chistoyedova // MEPhl's Section of the Scientific Session on «Breakthrough directions of scientific research at MEPhl: Development prospects within the Strategic Academic Units». – 2018. – P. 261–265. – doi: 10.18502/keg.v3i6.3002

### Данилина Тамара Ивановна

Канд. техн. наук, профессор каф. физической электроники (ФЭ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-960-971-27-43  
Эл. почта: danti123@mail.ru

### Чистоедова Инна Анатольевна

Канд. техн. наук, доцент каф. ФЭ ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-810-44-25  
Эл. почта: innachist@mail.ru



**Заречнев Антон Дмитриевич**

Магистрант каф. ФЭ ТУСУРа

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

Тел.: +7-952-808-47-78

Эл. почта: Zzarechnev.a@yandex.ru

Danilina T.I., Chistoyedova I.A., Zarechnev A.D.

### Delay time of the signal in very-large integrated circuits

The method to calculate the delay time of a signal is proposed that allows to predict the magnitude of the signal delay taking into account parasitic components of inductance and capacitance of the metallization. The method is based on the results of modeling resistance, capacitance and inductance metallization in COMSOL Multiphysics. It is established that the contribution of the inductive component can be disregarded when the topological norm of ultra-large integrated circuits is reduced from 90 to 7 nm.

**Keywords:** VLSI metallization, submicron metallization, delay time, COMSOL.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-20-24

### References

1. Saraswat K. *Interconnect Scaling*. USA, Stanford. Dept. Elect. Eng., Stanford University, 2009, 32 p.
2. Friedman G. *On-Chip Interconnect: The Past, Present, and Future*. USA, Rochester, NY. Dept. Elect. and Computer Eng., Rochester University, 2006, 68 p.
3. Jaing Y. *Modeling and Optimization of VLSI Interconnects*. USA, Nevada, Las Vegas. Dep. Elect. and Computer Eng., University of Nevada Las Vegas, 2006, 100 p.
4. COMSOL Multiphysics. URL: <https://www.comsol.ru> (accessed: July 20, 2018).
5. The International Technology Roadmap for Semiconductors. URL: <http://www.itrs2.net> (accessed: July 20, 2018).
6. Xhou G., Su L., Jin D. *A Delay Model for Interconnect Trees Based on ABCD Matrix*. China, Beijing, Dep. Elect. Eng., Tsinghua University, 2010, 18 p.
7. Uma R., Krishnappriya I. New modified Elmore delay model for resistance – capacitance – conductance (RCG) interconnect network scheme. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 54, no. 3, 2013, pp. 361–371.
8. Kumar A. Study the performance analysis of carbon nanotube as a VLSI interconnect. - Patiala: Thapar University, 2012. 101 p. URL: <http://hdl.handle.net/10266/1898> (accessed: June 28, 2018).
9. Ismail I., Friedman Eby G. Effects of Inductance on the Propagation Delay and Repeater Insertion in VLSI Circuits: a Summary. *Circuits and Systems Society Outstanding Young Author Award*. 2002, vol.8, no. 2, pp. 195–206.
10. Murgan T., Schlachta C., Petrov M. Accurate Capture of Timing Parameters in Inductively. *Coupled On-Chip Interconnects SBCCI'04*, 2004, pp. 117–122.

11. Accurate A Priori Signal Integrity Estimation Using A Multilevel Dynamic Interconnect Model for Deep Submicron VLSI Design // Solid-State Circuits Conference, 2000. URL: [https://www.researchgate.net/publication/4157861\\_Accurate\\_a\\_priori\\_signal\\_integrity\\_estimation\\_using\\_a\\_multilevel\\_dynamic\\_interconnect\\_model\\_for\\_deep\\_submicron\\_VLSI\\_design](https://www.researchgate.net/publication/4157861_Accurate_a_priori_signal_integrity_estimation_using_a_multilevel_dynamic_interconnect_model_for_deep_submicron_VLSI_design) (accessed: 15 July 18).

12. Abinash R., Noha M. Effects of Coupling Capacitance and Inductance on Delay Uncertainty and Clock Skew. USA, Illinois Chicago, Dep. Elect. and Computer Eng., University of Illinois at Chicago, 2007, pp. 184–187.

13. Ramadass U., Krishnappriya, Ponnian J. A Novel Interconnect Structure for Elmore Delay Model with Resistance – Capacitance – Conductance Scheme. *American Journal of Applied Sciences*, 2013, 10 (8), pp. 881–892. doi: 10.3844/ajassp.2013.881.892.

14. Danilina T.I., Chistoyedova I.A. Selection of conductive film thickness for submicron metallization. *International Scientific Conference Electronic Devices and Control Systems*, 2017, № 1 (1), pp. 95–97 (in Russ.).

15. Danilina T.I., Chistoyedova I.A. Selection of conductive film thickness for submicron metallization. *MEPhI's Section of the Scientific Session on «Breakthrough directions of scientific research at MEPhI: Development prospects within the Strategic Academic Units»*, 2018, pp. 261–265. doi: 10.18502/keg.v3i6.3002.

### Tamara I. Danilina

Doctor of Engineering, Professor Department of Physical Electronics Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-960-971-27-43  
Email: tamara.i.danilina@tusur.ru

### Inna A. Chistoyedova

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor Department of Physical Electronics Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-810-44-25  
Email: innachist@mail.ru

### Anton D. Zarechnev

Master student, Department of Physical Electronics Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-808-47-78  
Email: Zzarechnev.a@yandex.ru

УДК 537.877

В.П. Беличенко, А.С. Запасной, В.П. Якубов, А.С. Мироньчев

## Пространственная структура фазового состояния поля, порожденного системой близкорасположенных излучателей

Обсуждаются вопросы, касающиеся фазового состояния ближнего поля, порождаемого уединенными излучателями, а также системами таких излучателей. Отмечена продуктивность технологии ближнепольного низкочастотного многокурсового пассивного зондирования при решении задач высокоточной локализации уединенного излучателя (метки) в условиях сложнопостроенной среды распространения излучения. Предложено идейную основу данной технологии использовать применительно к задачам ближнепольного интерференционного сверхвысокочастотного зондирования сред и объектов среднего уровня разрешения. В рамках данного подхода зондирование должно осуществляться перекрывающимися ближними полями двух, по крайней мере, активных зондов и помимо параметров, измеряемых при традиционном ближнепольном зондировании, должна учитываться и фаза коэффициента отражения сигнала от зонда. Приведены результаты компьютерного моделирования, иллюстрирующие особенности в зависимостях фазы поля от геометрии зондов и их взаимного расположения.

**Ключевые слова:** фазовый переход, фаза ближнего поля, ближнепольное местоопределение, эванесцентные поля, интерференционный поток энергии.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-25-29

Электромагнитному полю, как и ряду других видов материи, свойственно нахождение в определенных фазовых состояниях. Например, в ближней зоне любой излучающей системы имеется, как правило, достаточно большой запас энергии, которая является преимущественно реактивной вследствие наличия фазового сдвига между векторами напряженностей электрического и магнитного полей. В то же время в дальней зоне подобного фазового сдвига нет, и поэтому состояние поля характеризуется доминированием активной энергии.

Своеобразная динамика перехода электромагнитного поля из одного фазового состояния в другое была подмечена, по-видимому, впервые выдающимся физиком-теоретиком Р. Фейнманом и описана в известной книге «Фейнмановские лекции по физике. Т. 6. Электродинамика». Изучая структуру ближнего поля простейшего излучателя – диполя Герца, он установил, что в этой зоне отсутствует временное запаздывание колебаний поля относительно колебаний порождающего его тока в диполе. Но при этом имеется достаточно четко выраженная граница перехода поля из одного состояния в другое, а именно из квазистационарного в состояние излучения. Такой переход имеет ряд черт, позволяющих охарактеризовать его как переход второго рода. Фазовым переходам второго рода, как известно, свойственно не столько быстрое изменение параметров, характеризующих состояние материи, сколько высокая скорость, с которой эти изменения происходят.

Интерес к изучению поведения фазы компонент поля в пределах различных зон излучателей проявляется достаточно продолжительное время. Уже на начальной стадии исследований электромагнитных процессов Г. Герц рассчитал зависимости фаз компонент поля элементарного электрического диполя по мере удаления точки наблюдения от диполя вдоль направления максимального излучения

[1]. В результате им была выявлена область очень быстрого изменения разности фаз поперечных компонент электрического и магнитного полей в пределах малой пространственной области. В других исследованиях в различных областях электродинамики и антенной техники [2–5], проведенных значительно позже, также указывалось на наличие такой области.

Однако продуктивное воплощение выявленного эффекта не столько в теоретических работах, сколько в практических приложениях было предложено Н.Г. Schantz [6–8]. Дело в том, отмеченная выше особенность поведения разности фаз наблюдается в пределах пространственной области с характерным размером  $(0,08 - 0,3 \lambda)$ , где  $\lambda$  – длина волны. Это обстоятельство позволило предположить, что технология, основанная на многокурсном измерении разности фаз электрического и магнитного полей, создаваемых источником колебаний с достаточно большой длиной волны в ближней зоне приемной антенны, позволит весьма существенно повысить точность определения положения источника излучения.

Актуальность проблемы заключается в том, что разработанные многочисленные методы определения местоположения различных объектов с помощью сверхширокополосных сигналов, обладая несомненными достоинствами, имеют и недостатки. Так, внутренняя структура зданий и сооружений, а также элементы городской среды оказывают существенное влияние на распространение высокочастотных радиосигналов. Это проявляется в быстрых изменениях амплитуды и фазы, поскольку сигналы, распространяющиеся по различным траекториям, рассеиваются труднопредсказуемым образом и создают помехи друг другу. В общем случае задача эффективного приема многолучевого радиосигнала является технически сложной.

Для ряда приложений низкочастотные сигналы вследствие лучшего проникновения в поглощающие

среды могут иметь предпочтения. Наличие в ближней зоне, наряду с поперечными, радиальной компоненты поля, а также отсутствие синхронизации у компонент электрического и магнитного полей дают возможность для отслеживания большего числа параметров полезного сигнала.

В качестве альтернативной в последнее время активно развивается NFER® Real Time Location Systems (RTLS) технология [6–8]. Реализующие её системы работают на низких частотах, как правило, около 1 МГц. Причем они используют характерные особенности поведения фазы нераспространяющихся (эванесцентных) полей в ближней зоне метки-передатчика (tag transmitter). Достижимая точность нахождения метки составляет 1–3 фута на расстоянии 60–200 футов [8].

На текущий момент имеются сведения об успешном использовании технологии в системах слежения и связи при перемещениях погрузчиков между плотно установленными стандартными грузовыми контейнерами, при работе в сложных условиях распространения сигнала на ядерных объектах и в складских помещениях, в системах обеспечения пожарной безопасности, предупреждения о чрезвычайных ситуациях, в том числе об атаках на сети компьютерной информации. Более того, предложено реализовывать данную технологию с применением широкополосных сигналов [9].

#### Проблема фазового состояния поля в ближнепольной интерференционной СВЧ-диагностике

Известно [10–13], что в перекрывающихся эванесцентных полях, порождаемых распределенными в пространстве системами излучателей, имеют место интересные интерференционные эффекты, обуславливающие появление специфических интерференционных потоков энергии. В этой связи значительный интерес представляет исследование особенностей фазовой структуры поля в зоне перекрытия эванесцентных полей, а также и вне неё. Этот интерес вызван, в частности, задачами ближнепольного зондирования сильно и слабо поглощающих сред и объектов.

В работе рассматриваются особенности фазового состояния поля в области перекрытия эванесцентных полей двух активных зондов электрического и магнитного типов. Как оказывается при использовании подобной конфигурации зондов, выделяются два неизлучающих интерференционных потока энергии, характеризующиеся разной зависимостью от разности начальных фаз токов в зондах. Показано, что именно эти потоки ответственны за особенности фазового состояния суммарного поля. Динамика изменения фазы поля изучена на примерах упрощенных моделей активных ближнепольных зондов. В качестве таких моделей рассмотрены:

- разнесенные в пространстве и коллинеарные два элементарных электрических диполя (рис. 1, а);
- разнесенные в пространстве и ортогонально ориентированные элементарные электрический и магнитный диполи (рис. 1, б).

Как показали наши исследования, наиболее ярко как наличие фазового перехода электромагнитного поля, так и пространственное положение воображаемой поверхности, на которой он происходит, устанавливается при исследовании скорости изменения с расстоянием фазы поля в ближней зоне.

Поэтому концептуальное значение имеет нахождение экстремальных (максимальных) значений производной в зависимости фазы поля от расстояния в пределах ближней зоны зондирующей системы.

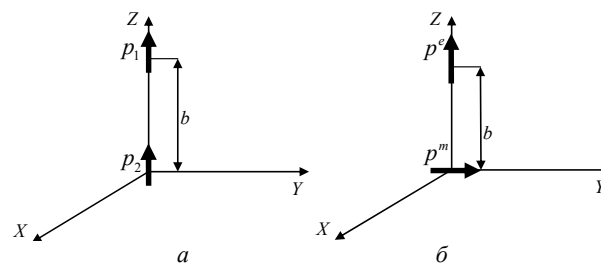


Рис. 1. Модели зондирующих систем, содержащих идентичные и неидентичные зонды

#### Результаты численного моделирования и их интерпретация

Ниже представлены результаты моделирования для системы, изображенной на рис. 1, а.

При моделировании нами были использованы мультипольные разложения произвольной системы электрических и магнитных токов в сферической системе координат [14] и специальные формулы суммирования типа представленных в [11, 12]. Это позволило кардинальным образом упростить процедуру расчетов в силу того, что в ближней зоне исходные мультипольные разложения оказываются крайне медленно сходящимися.

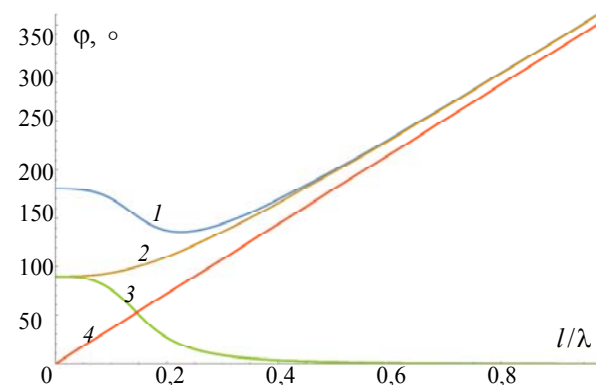


Рис. 2. Поведение фазы компонент электрического и магнитного полей уединенного диполя в ближней зоне ( $p_2 \neq 0$ ,  $p_1 = 0$ ): 1 – фаза компоненты  $E_0$ ; 2 – фаза компоненты  $H_0$ ; 3 – разность фаз  $E_0$  и  $H_0$ ; 4 – фаза в дальней зоне

На рис. 2–4 отражены поведение фаз компонент полей, а также их разности по мере удаления от системы диполей в направлении оси  $y$ . Расстояние отсчитывается в долях длины волны. Как видно, для уединенного диполя разность фаз компонент поля  $E_0$  и  $H_0$  претерпевает существенное изменение именно в пределах указанного выше интервала расстояний:  $(0,08–0,3)\lambda$ .

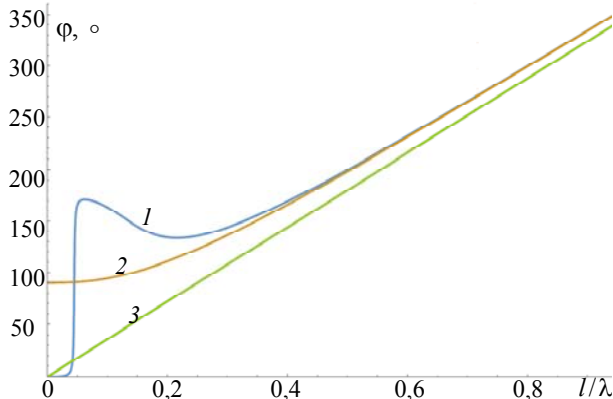


Рис. 3. Поведение фазы компонент суммарных электрических и магнитных полей двух диполей в ближней зоне, отстоящих на расстоянии  $0,06\lambda$  друг от друга:  
1 – фаза компоненты  $E_\theta$ ; 2 – фаза компоненты  $H_\phi$ ;  
3 – фаза в дальней зоне

Использование системы диполей с одинаковыми моментами, но с регулируемой разностью фаз токов в них позволяет заметным образом сократить этот интервал (см. рис. 3, 4), что представляется весьма существенным при решении задач многокурсного активного зондирования.

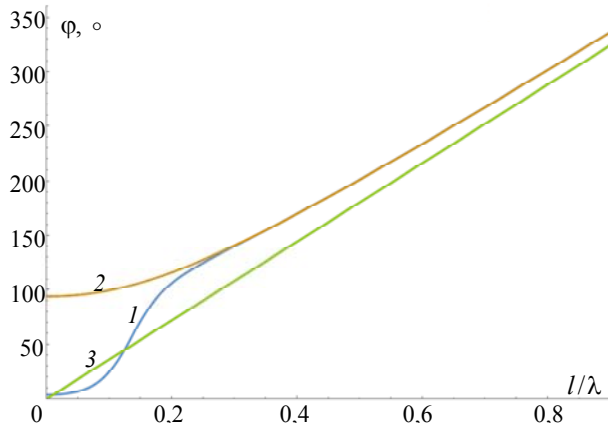


Рис. 4. Поведение фазы компонент суммарных электрических и магнитных полей двух диполей в ближней зоне, отстоящих на расстоянии  $0,2\lambda$  друг от друга:  
1 – фаза компоненты  $E_\theta$ ; 2 – фаза компоненты  $H_\phi$ ;  
3 – фаза в дальней зоне

Описанное выше рассмотрение дополнено нами подробным изучением поведения фаз компонент электрического и магнитного полей в промежутке между двумя параллельными (рис. 5, а) и коллинеарными электрическими вибраторами (рис. 5, б). При расчетах предполагалось, что токи в вибраторах меняются по синусоидальному закону, а расчетные формулы для полей в ближней зоне были взяты из [15].

Эта часть исследования мотивируется тем обстоятельством, что два близко расположенных активных зонда могут создавать в промежутке между ними суммарные поля, фазами которых можно управлять путем изменения электрической длины промежутка между зондами. Данное обстоятельство может иметь существенное значение в проблеме

ближнепольного зондирования, поскольку современная ближнепольная СВЧ-микроскопия уже обеспечена инструментарием, позволяющим измерять не только традиционные параметры (коэффициент отражения от исследуемого образца, сдвиг резонансной частоты, добротность), но и фазу ближнего поля.

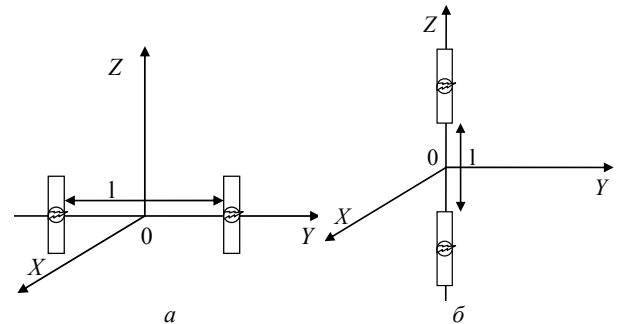


Рис. 5. Геометрия задачи, относящейся к расчету фаз компонент электрического и магнитного полей в промежутке между двумя вертикальными электрическими вибраторами

Рисунок 6 иллюстрирует пример поведения фаз компонент  $E_z$ ,  $E_\rho$ ,  $H_\phi$  суммарного поля двух вибраторов (см. рис. 5, а) в промежутке между ними в цилиндрической системе координат, начало которой находится в точке О. Параметры расчета: длина волны  $\lambda=0,03$  м, длина вибраторов  $l=\lambda/20$ , расстояние  $d$  между вибраторами выбрано исходя из соотношения  $d=4l^2/\lambda$ . Можно отметить некоторые особенности в поведении фаз компонент полей. Так, например, фаза компоненты  $E_z$  испытывает скачок на  $\pi$ . Свообразием отличается поведение фазы компоненты  $E_\rho$ , сочетающее отрезок с практически постоянным значением фазы и последующее её резкое изменение. В то же время фаза компоненты  $H_\phi$  магнитного поля практически постоянна, а видимый скачок фазы составляет величину, равную  $2\pi$ .

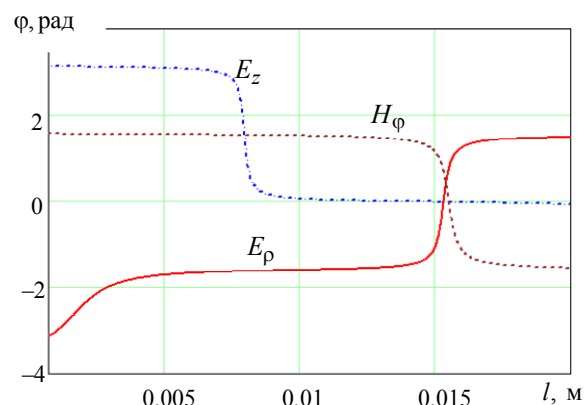


Рис. 6. Поведение фазы компонент суммарных электрических и магнитных полей двух вибраторов в ближней зоне

Что касается разности фаз компонент  $E_z$  и  $H_\phi$  суммарного поля, то она сохраняет постоянное значение в промежутке между вибраторами (рис. 7).

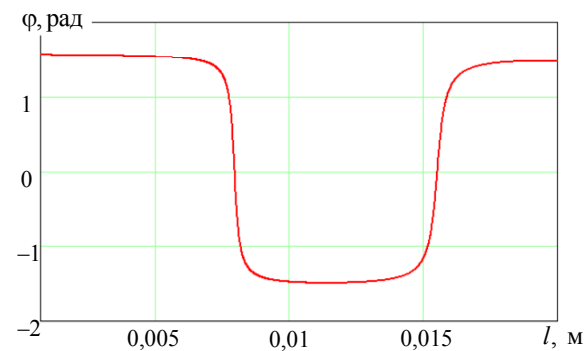


Рис. 7. Разность фаз компонент  $E_z$  и  $H_\phi$  двух вибраторов в ближней зоне

Рисунок 8 иллюстрирует поведение фазы компоненты  $E_z$  электрического поля в промежутке между торцами двух коллинеарных электрических вибраторов. Этот случай интересен в том отношении, что именно продольная компонента электрического поля является доминирующей в ближней зоне излучающей системы. Поэтому в ряде реальных конструкций ближнепольных СВЧ-микроскопов предпринимались меры, направленные на её максимизацию. Можно отметить вполне прогнозируемую симметричность кривой, отображающей поведение фазы. Интересной же особенностью является практически постоянное (нулевое) значение фазы в пределах небольшого интервала, включающего в себя центральную часть промежутка между вибраторами.

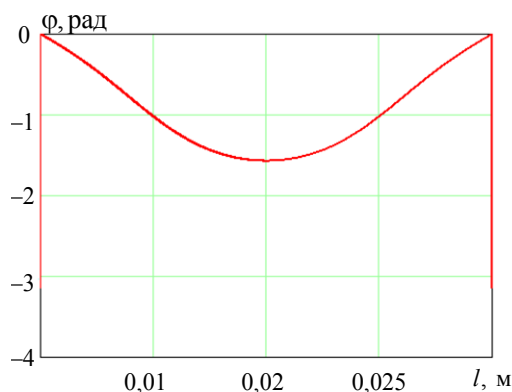


Рис. 8. Поведение фазы компоненты  $E_z$  суммарного поля двух вибраторов в ближней зоне

### Выводы

С использованием численного моделирования продемонстрирована возможность эффективного управления фазовой структурой электрического и магнитного полей, а также разностью фаз этих полей в пределах зоны перекрытия эванесцентных полей двух активных зондов. Отмечено, что выявленные особенности фазовой структуры полей могут найти применение в задачах ближнепольной диагностики сред и объектов среднего уровня разрешенности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 16-42-700942 регионального конкурса (p\_сибирь\_a).

### Литература

1. Hertz H. The Forces of Electrical Oscillations Treated According to Maxwell's Theory // Nature. – 1889. – Vol. 39. – P. 402 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/hertz\\_nature\\_39\\_402\\_89.pdf](http://physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/hertz_nature_39_402_89.pdf), свободный (дата обращения: 20.12.2018).
2. Schantz H.G. The flow of electromagnetic energy around an electric dipole // American Journal Physics. – 1995. – Vol. 63, No. 6. – P. 513–520.
3. Schantz H.G. Electromagnetic energy around Hertzian dipoles // IEEE Antennas and Propag. Magazine. – 2001. – Vol. 43, No. 2. – P. 50–62.
4. Valagiannopoulos C.A., Alú A. The role of reactive energy in the radiation by a dipole antenna // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 2015. – Vol. 63, No. 8. – P. 3736–3741.
5. Fundamental limits on antenna size: a new limit / W.A. Davis, T. Yang, E.D. Caswell, W.L. Stutzman // IET Microwave Antennas Propag. – 2011. – Vol. 5, No. 11. – P. 1297–1302.
6. Schantz H., Fluhler J. Near-field technology – an emerging rf discipline / Editors: H. Lacoste & L. Ouweland // Proceedings of The European Conference on Antennas and Propagation: EuCAP 2006 (ESA SP-626). 6–10 November 2006, Nice, France. – Published on CDROM. – P. 2.1.
7. U.S. Patent 8,253,626. Multiple Phase State Near-Field Electromagnetic System and Method for Communication and Location / H.G. Schantz, A. Compston, R.E. DePierre, J.M. Barron. – March 15, 2016.
8. U.S. Patent 9,285,453. Method of Near-Field Electromagnetic Ranging and Location / H.G. Schantz, R.E. DePierre, A.H. Uden, E.A. Richards. – August 28, 2012.
9. Wideband signal based near-field electromagnetic ranging for indoor localization / P. Wang, Z. Liu, X. Zhang, L. Xu, J. He, Y. Wan // Advances in Intelligent Systems Research (AISR). – Atlantis Press. – 2018. – Vol. 155. – P. 243–247.
10. Maeda S., Diamant P. Power flow between adjacent electric dipoles // IEEE Antennas and Propag. Magazine. – 2003. – Vol. 44, No. 6. – P. 68–76.
11. Управление величиной и пространственным распределением интерференционных потоков энергии в ближних полях систем идентичных излучателей / В.П. Беличенко, А.С. Запасной, П.В. Шестаков // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 118, № 4. – С. 633–636.
12. Роль эванесцентных полей в процессе формирования излучения комбинированных излучающих систем / В.П. Беличенко, А.С. Запасной, П.В. Шестаков // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 118, № 4. – С. 630–632.
13. The technology of near-field interference microwave sensing / V.P. Belichenko, A.S. Zapasnoy, A.S. Mironchev, P.V. Shestakov // Material Science Forum. – 2016. – Vol. 870. – P. 730–734.
14. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.
15. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 266 с.

### Беличенко Виктор Петрович

Доктор физ.-мат. наук, профессор  
каф. радиофизики (РФ) Национального исследовательского  
Томского государственного университета (НИ ТГУ)  
Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63  
Эл. почта: [bvp@mail.tsu.ru](mailto:bvp@mail.tsu.ru)

**Запасной Андрей Сергеевич**

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. РФ НИ ТГУ  
Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-961-095-96-97  
Эл. почта: zas\_rff@live.com

**Якубов Владимир Петрович**

Д-р физ.-мат. наук, зав. каф. РФ НИ ТГУ  
Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63  
Эл. почта: yvlp@mail.tsu.ru

**Мироньев Александр Сергеевич**

Инженер каф. РФ НИ ТГУ  
Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63  
Эл. почта: mironchev42@mail.ru

Belichenko V.P., Zapasnoy A.S.,  
Yakubov V.P., Mironchev A.S.

**Spatial structure of the phase state of the field generated by a system of closely spaced radiators**

Questions concerning the phase state of the near field generated by single radiator, as well as systems of such radiators, are discussed. The productivity of the near-field low-frequency multi-view sensing technology is emphasized when solving the tasks of high-precision localization of a single radiator (tag) in conditions of a complexly constructed medium in which radiation is propagated. A method to develop this technology by applying to the tasks of near-field sensing of media and objects of medium resolution is proposed. The basis of this technique is active multi-view sounding systems of closely located radiators. Examples of computer modeling are presented, demonstrating the fundamental capabilities of the technique.

**Keywords:** phase transition, near field phase, near-field location, evanescent fields, interference energy flow.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-25-29

*References*

1. Hertz H. The Forces of Electrical Oscillations Treated According to Maxwell's Theory. *Nature*, 1889, vol. 39, P. 402. Available at: [http://physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/hertz\\_nature\\_39\\_402\\_89.pdf](http://physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/hertz_nature_39_402_89.pdf) (accessed: December 20, 2018).
2. Schantz H.G. The flow of electromagnetic energy around an electric dipole. *American Journal Physics*, 1995, vol. 63, no. 6, pp. 513–520.
3. Schantz H.G. Electromagnetic energy around Hertzian dipoles, *IEEE Antennas and Propag. Magazine*, 2001, vol. 43, no. 2, pp. 50–62.
4. Valagiannopoulos C.A., Alú A. The role of reactive energy in the radiation by a dipole antenna. *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, 2015, vol. 63, no. 8, pp. 3736–3741.
5. Davis W.A., Yang T., Caswell E.D., Stutzman W.L. Fundamental limits on antenna size: a new limit. *IET Microwave Antennas Propag.*, 2011, vol. 5, no. 11, pp. 1297–1302.
6. Schantz H., Fluhler J. Near-field technology – an emerging rf discipline / Editors: H. Lacoste & L. Ouwehand. *Proceedings of The European Conference on Antennas and Propagation: EuCAP 2006 (ESA SP-626)*. 6–10 November 2006, Nice, France. – Published on CDROM. – P. 2.1.

7. Schantz H.G., Compston A., DePierre R.E., Barron J.M. *Multiple Phase State Near-Field Electromagnetic System and Method for Communication and Location*. U.S. Patent no. 8, 253, 626, March 2016.

8. Schantz H.G., DePierre R.E., Uden A.H., Richards E.A. *Method of Near-Field Electromagnetic Ranging and Location*. U.S. Patent no. 9,285,453, August 2012.

9. Wang P., Liu Z., Zhang X., Xu L., He J., Wan Y. Wideband signal based near-field electromagnetic ranging for indoor localization. *Advances in Intelligent Systems Research (AISR)*, Atlantis Press, vol. 155, 2018, pp. 243–247.

10. Maeda S., Diamant P. Power flow between adjacent electric dipoles. *IEEE Antennas and Propag. Magazine*, 2003, vol. 44, no. 6, pp. 68–76.

11. Belichenko V.P., Zapasnoy A.S., Shestakov P.V. Control of the Magnitude and Spatial Distribution of Interference Energy Flows in Near Fields of Systems of Identical Radiators. *Optics and Spectroscopy*, 2015, vol. 118, no. 4, pp. 605–608.

12. Belichenko V.P., Zapasnoy A.S., Shestakov P.V. The Role Played by Evanescent Fields in the Process of Formation of Radiation of Combined Radiating Systems. *Optics and Spectroscopy*, 2015, vol. 118, no. 4, pp. 602–604.

13. Belichenko V.P., Zapasnoy A.S., Mironchev A.S., Shestakov P.V. The technology of near-field interference microwave sensing. *Material Science Forum*, 2016, vol. 870, pp. 730–734.

14. Markov G.T., Chaplin A.F. *Vozbuzhdenie elektromagnitnykh voln* [Excitation of electromagnetic waves]. M.: Radio i svyaz, 1983, 296 p.

15. Markov G.T., Sazonov D.M. *Antenny* [Antennas] // Edition 2, revised and updated. M.: Energiya, 1975, 266 p.

**Victor P. Belichenko**

Doctor of Physics and Mathematics,  
Professor, Department of Radiophysics,  
National Research Tomsk State University (NI TSU)  
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-34-63  
Email: bvp@mail.tsu.ru

**Andrey S. Zapasnoy**

Candidate of Physics and Mathematics,  
Associate Professor, Department of Radiophysics NI TSU  
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-961-095-96-97  
Email: zas\_rff@live.com

**Vladimir P. Yakubov**

Doctor of Physics and Mathematics,  
Head of Department of Radiophysics NI TSU  
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-34-63  
Email: yvlp@mail.tsu.ru

**Aleksander S. Mironchev**

Candidate of Physics and Mathematics,  
Engineer, Department of Radiophysics NI TSU  
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-34-63  
Email: mironchev42@mail.ru

УДК 53.082.74

В.П. Беличенко, А.С. Мироньев, А.В. Клоков, А.С. Запасной

## Моделирование резонансных полосковых зондов для интерференционной ближнепольной микроскопии

Проведен анализ различных видов зондов, используемых в приборах ближнепольной микроволновой микроскопии. Описаны особенности зондов каждого типа и области их применения. Отдельно представлены конструктивные особенности и результаты компьютерного моделирования зонда, нагруженного на микрополосковый резонатор, который входит в состав разработанного макета ближнепольного интерференционного микроволнового микроскопа.

**Ключевые слова:** ближнепольная диагностика, зонд, эванесцентные поля, микроволновый микроскоп, разрешающая способность.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-30-34

Ближнепольное радиоволновое зондирование применяется в целом ряде областей, относящихся к неразрушающим и бесконтактным методам с очень высоким разрешением. Например, для обнаружения субмикронных дефектов и изменений в концентрации носителя заряда в полупроводниковом материале; для визуализации изменений проводимости в биологических объектах с диагностическими целями. На сегодняшний день существует множество разнообразных схем реализации ближнепольных микроскопов. Различия главным образом заключаются в реализации конструкций зондов, которые являются важнейшими элементами таких систем.

### Коаксиальные зонды

Один из наиболее распространенных вариантов ближнепольного микроволнового микроскопа использует в качестве зонда отрезок коаксиальной линии, имеющей продолжение в виде коаксиального зонда с заостренным внутренним проводником [1]. Уже первая версия такого микроскопа позволила получить разрешение, равное 100 мкм, при использовании гармонических колебаний с частотой 12 ГГц. Пожалуй, наиболее удачной конструкцией зонда ближнепольного микроволнового микроскопа нужно признать оригинальное решение, предложенное в [2, 3], где зонд интегрирован с высокодобротным четвертьволновым коаксиальным резонатором (рис. 1).

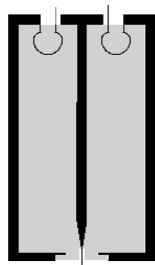


Рис. 1. Коаксиальный зонд в виде высокодобротного четвертьволнового резонатора

Следует отметить, что предложенное в [4, 5] выполнение центрального проводника коаксиального резонатора в виде двухпроводной полосковой линии, образованной путем напыления алюминия-

вых пленок на противоположные грани сужающегося кварцевого стержня, позволило использовать при возбуждении резонатора симметричную нечетную моду, что в конечном итоге обеспечило возможность достижения еще большего пространственного разрешения. В данном случае размер апертуры составил величину порядка  $5 \times 5$  мкм.

В статье [6] исследуются возможности метода резонансного ближнепольного микроволнового зондирования для неинвазивной диагностики меланомы и других новообразований кожи. Метод, предложенный в этой работе, позволяет визуализировать распределения диэлектрической проницаемости и проводимости биологических тканей.

Измерительная система для исследования меланомы кожи представляет собой СВЧ-резонатор (рис. 2) в виде отрезка коаксиальной линии с фторопластовым заполнением, на одном конце которого расположена магнитная рамка (для этого центральный проводник коаксиальной линии замыкается на экран, образуя индуктивную нагрузку). К противоположному концу резонатора посредством выносного коаксиального кабеля подключается аппликатор, содержащий на конце цилиндрический конденсатор. Зондирование биологических тканей осуществляется краевой емкостью цилиндрического конденсатора аппликатора (измерительная ёмкость). Для уменьшения вносимых в резонатор потерь при контакте с поверхностью исследуемого объекта в точке подключения выносного кабеля к резонатору параллельно впаяна индуктивность.



Рис. 2. СВЧ-резонатор с оконечным цилиндрическим конденсатором для неинвазивной диагностики меланомы

### Полосковые зонды

Еще ранее в качестве зондов использовались малые апертуры в проводящих экранах или же на конце сужающегося круглого волновода. Однако подобным зондам свойственно значительное уменьшение чувствительности по мере уменьшения размеров апертуры с целью увеличения разрешающей способности. Радикально исправить положение удалось путем существенного изменения конфигурации апертуры. А именно, было предложено применять апертуры прямоугольной формы в виде очень узкой щели длиной порядка длины волны, прорезанной посередине проводящей пластины, закрывающей открытый конец прямоугольного волновода [7]. И тем не менее у подобной конструкции обнаруживается недостаток, связанный с резонансным поведением пропускающей способности апертуры. Улучшенный вариант конструкции был предложен на пути сужения примыкающей к апертуре части прямоугольного волновода до образования узкой щели с продольным размером порядка длины волны [8]. Выполнение микроскопа на базе микрополоскового резонатора [9] позволило достичь разрешения 0,4 мкм, что составило в долях длины волны  $\lambda$  используемого излучения величину  $\lambda/750000$ . Известны также и принципиально иные конструктивные решения микроскопа [10].

В [11] теоретически было показано, что ближнепольный (квазистационарный) компонент теплового излучения должен существенно влиять на интенсивность сигнала, измеряемого радиометром, если антенна имеет малые электрические размеры и расположена на высоте  $h \ll \lambda$  над излучающей поверхностью. В этой статье представлены разработанная радиометрическая система для ближнепольных измерений, результаты исследования ближнепольных эффектов в тепловом излучении и восстановления подповерхностного температурного профиля среды по данным ближнепольных радиометрических измерений. При измерениях использовались зонды, в которых центральный проводник реализован в виде двухпроводной полосковой линии. Данная схема зондов была выполнена на фольгированном стеклотекстолите (рис. 3).

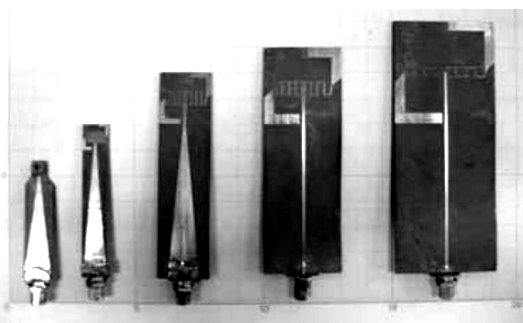


Рис. 3. Зонды, реализованные на полосковых линиях

Принцип работы сканирующих микроволновых микроскопов, как правило, такой: регистрируются резонансная частота, добротность резонатора и высота расположения зонда над исследуемым образ-

цом. При изменении расстояния между зондом и образцом будет происходить изменение как резонансной частоты, так и добротности. Таким образом, топология поверхности образца имеет весьма существенное значение при исследовании его свойств (диэлектрическая проницаемость, проводимость и т.д.). Тем не менее в микроволновом диапазоне уже вполне обеспечивается субмикронное разрешение [1].

Здесь уместно отметить, что во всех известных нам моделях ближнепольных микроскопов используется только один зонд. Причем осуществляется его механическое перемещение над исследуемой поверхностью. В данной работе рассматриваются возможности создания модели ближнепольного микроскопа, в котором будут использованы как минимум два активных резонансных зонда [12], причем в полосковом исполнении.

Вследствие наличия у зондов нескольких резонансных частот предполагается осуществлять зондирование исследуемого объекта перекрывающимися эванесцентными полями упомянутых активных зондов, реализуя, таким образом, процедуру ближнепольного интерференционного микроволнового зондирования на сетке резонансных частот зондов. Предтечей такого подхода явилось теоретическое исследование [13], в котором были описаны процессы формирования энергетических потоков в перекрывающихся эванесцентных полях излучающих систем, содержащих нескольких пространственно разнесенных элементарных излучателей.

### Результаты компьютерного моделирования полосковых зондов

В качестве основы для компьютерного моделирования изначально была взята конструкция зонда, описанная в работах [14, 15] А.Н. Резника с соавт (Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород). Зонд представляет собой компактный микрополосковый резонатор, к которому подключена электрически малая патч-антенна, представляющая собой металлизированную квадратную пластину текстолита со стороной 0,9 см. Нами размеры микрополосков и антенны подбирались по результатам моделирования в программном продукте CST Microwave studio. Геометрия зонда изображена на рис. 4.

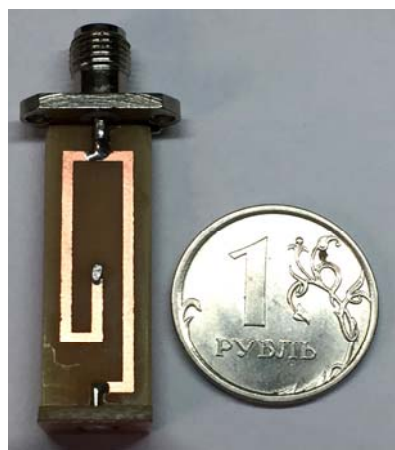


Рис. 4. Зонд на основе микрополоскового резонатора



Прежде всего моделирование позволило оценить размеры области ближнего поля, создаваемого зондом. Как и ожидалось, они оказались соизмеримыми с размерами апертуры патч-антенны (рис. 5). Это обстоятельство указывает на обоснованную возможность осуществления ближнепольного интерференционного микроволнового зондирования объектов толщиной вплоть до 1 см, по крайней мере, если, конечно же, проводимость объекта не слишком высока.

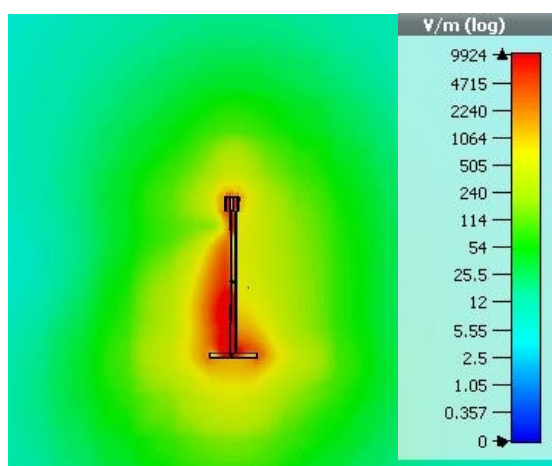


Рис. 5. Распределение электрического поля вблизи зонда

С учетом результатов компьютерного моделирования были изготовлены несколько зондов, нагруженных на резонатор в микрополосковом исполнении (см. рис. 4). Характеристики зондов экспериментально исследовались с использованием векторного рефлектометра САВАН R140. Частотный диапазон работы этого прибора занимает интервал от 85 МГц до 14 ГГц. На рис. 6 в качестве примера представлена частотная зависимость параметра  $S_{11}$  одного из зондов. Можно отметить наличие трех резонансных частот, что позволяет рассчитывать на расширение сферы их применения.

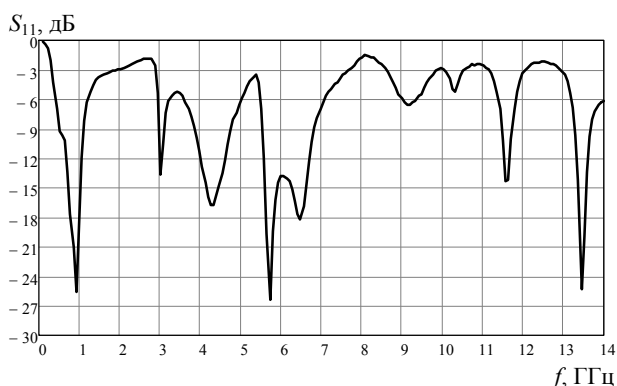


Рис. 6. Частотная зависимость параметра  $S_{11}$  зонда

Рисунки 7 и 8 наглядно иллюстрируют существенное увеличение размера области, занимаемой ближним (эванесцентным) полем в окрестности пространственно разнесенных и обращенных друг к другу апертур зондов по сравнению с аналогичной областью одного зонда (см. рис. 5). Определенный

вклад в структуру этой области вносят и интерференционные потоки энергии, образующиеся в промежутке между апертурами зондов. При этом имеет место влияние разности фаз сигналов ( $\Delta\varphi = 0$  или  $\Delta\varphi = 90$ ), подаваемых на входы зондов. На рис. 7, 8 приведены результаты моделирования для частоты 1 ГГц.

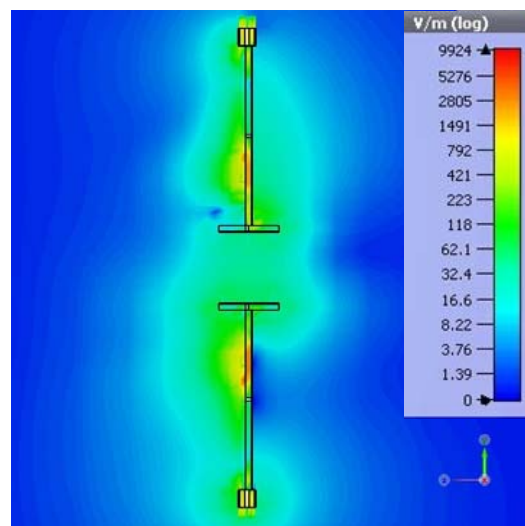


Рис. 7. Распределение электрического поля в окрестности апертур зондов ( $\Delta\varphi = 0$ )

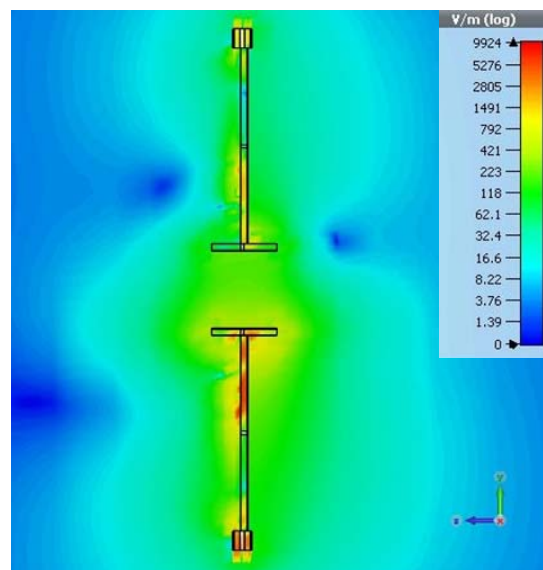


Рис. 8. Распределение электрического поля в окрестности апертур зондов ( $\Delta\varphi = 90$ )

### Выводы

Посредством компьютерного моделирования и экспериментальных исследований отработана конструкция ближнепольного зонда на основе электрически малой антенны, нагруженной на микрополосковый резонатор. Подтверждена возможность использования такого зонда в составе ближнепольного интерференционного микроволнового микроскопа с разрешением среднего уровня при зондировании объектов с характерной толщиной в 1 см по крайней мере.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 16-42-700942 регионального конкурса (р\_сибирь\_a).

#### Литература

1. Principles of Near-Field Microwave Microscopy / S.M. Anlage, V.V. Talanov, A.R. Schwartz // in Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale. Vol. 1, ed. by S.V. Kalinin and A. Gruverman. – New York: Springer-Verlag, 2007. – P. 215–253.
2. Scanning tip microwave near-field microscope / T. Wei, X.-D. Xiang, W.G. Wallace-Freedman, P.G. Schultz // Appl. Phys. Lett. – 1996. – Vol. 68, No. 24. – P. 3506–3508.
3. U.S. Patent № 7271574, МПК G01R 31/02. Evanescent microwave probe with enhanced resolution and sensitivity / X.D. Xiang, H. Yang, G. Wang; заявл. 11.07.2005; опублик. 18.09.2007. Заявитель: Intematix Corporation (Fremont, CA).
4. A near-field scanned microwave probe for spatially localized electrical metrology / V.V. Talanov, A. Scherz, R.L. Moreland, A.R. Schwartz // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 88. – P. 134106.
5. U.S. Patent № 7362108, МПК G01R 27/04. System and method for quantitative measurements of a material's complex permittivity with use of near-field microwave probes / V.V. Talanov, A.R. Schwartz, A. Scherz; заявл. 14.10.2005; опублик. 22.04.2008. Заявитель: Solid State Measurements, Inc. (Pittsburgh, PA).
6. Неинвазивная диагностика меланомы и других новообразований кожи методом резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования / Д.В. Янин, А.Г. Галка, А.И. Смирнов и др. // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/3/text.html>, свободный (дата обращения: 20.12.2018).
7. Golosovsky M., Davidov D. Newel millimeter wave near-field resistivity microscope // Appl. Phys. Lett. – 1996. – Vol. 68, No. 11. – P. 1579–1581.
8. Scanning near-field millimeter-wave microscopy using a metal slit as a scanning probe / T. Nozokido, J. Bae, K. Mizino // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2001. – Vol. MTT-49, No. 3. – P. 491–499.
9. Evanescent Microwave Microscopy / C. Martínez, V. Coello, R. Cortés, R. Villagómez // J. Korean Phys. Soc. – 2005. – Vol. 47. – P. 152–156.
10. 0.4  $\mu\text{m}$  spatial resolution with 1 GHz ( $\lambda = 30$  cm) evanescent microwave probe / M. Tabib-Azar, D.-P. Su, A. Pohar // Rev. Sci. Instrum. – 1999. – Vol. 70, No. 3. – P. 1725–1729.
11. Резник А.Н. Квазистационарное поле теплового излучения в теории контактной радиотермометрии // Изв. вузов. Радиофизика. – 1991. – Т. 34, № 5. – С. 512–517.
12. Беличенко В.П., Запасной А.С. Схемное решение ближнепольного микроволнового интерференционного микроскопа // Изв. вузов. – 2015. – Т. 58, № 10/3. – С. 62–65.
13. Управление величиной и пространственным распределением интерференционных потоков энергии в ближних полях систем идентичных излучателей / В.П. Беличенко, А.С. Запасной, П.В. Шестаков // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 118, № 4. – С. 633–636.
14. Резник А.Н., Юрасова Н.В. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи ближнепольной СВЧ-диагностики // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, вып. 1. – С. 90–104.
15. Reznik A.N., Yurasova N.V. Electrodynamics of microwave near-field probing: Application to medical diagnostics // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 98. – P. 114701(1)–114701(9).

#### Беличенко Виктор Петрович

Др физ.-мат. наук, профессор каф. радиофизики (РФ) Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ) Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63  
Эл. почта: [bvp@mail.tsu.ru](mailto:bvp@mail.tsu.ru)

#### Мироньев Александр Сергеевич

Инженер каф. РФ НИ ТГУ  
Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63  
Эл. почта: [mironchev42@mail.ru](mailto:mironchev42@mail.ru)

#### Клоков Андрей Владимирович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. РФ НИ ТГУ  
Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63  
Эл. почта: [701-kav@mail.tsu.ru](mailto:701-kav@mail.tsu.ru)

#### Запасной Андрей Сергеевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. РФ НИ ТГУ  
Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-96-095-96-97  
Эл. почта: [zas\\_rff@live.com](mailto:zas_rff@live.com)

Belichenko V.P., Mironchev A.S.,  
Klokov A.V., Zapasnoy A.S.

#### Simulation of resonant strip probes for interference near-field microscopy

The analysis of various types of probes used in near-field microwave microscopy devices was carried out. The features of the probes of each type and the area of their application are described. Separately presented are the design features and the results of computer simulation of a probe loaded on a microstrip resonator, which is part of the developed model of the near-field interference microwave microscope.

**Keywords:** near-field diagnostics, probe, evanescent fields, microwave microscope, resolution.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-30-34

#### References

1. Anlage S.M., Talanov V.V., Schwartz A.R. *Principles of Near-Field Microwave Microscopy* / in Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale. Vol. 1, ed/ by S.V. Kalinin and A. Gruverman. Springer-Verlag, New York, 2007, pp. 215–253.
2. Wei T., Xiang X.-D., Wallace-Freedman W.G., Schultz P.G. Scanning tip microwave near-field microscope. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 68, no. 24, pp. 3506–3508.
3. Xiang X.D., Yang H., Wang G. *Evanescent microwave probe with enhanced resolution and sensitivity*. U.S. Patent no 7271574, July 2005.
4. Talanov V.V., Scherz A., Moreland R.L., Schwartz A.R. A near-field scanned microwave probe for spatially localized electrical metrology. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 88, pp. 134106.
5. Talanov V.V., Schwartz A.R., Scherz A. *System and method for quantitative measurements of a material's complex permittivity with use of near-field microwave probes*. U.S. Patent no. 7362108, October 2005.
6. Yanin D.V., Galka A.G., Smirnov A.I., Kostrov A.V., Strikovskii A.V., Orlinskaya N.Yu., Epishkina A.A., Grebenkin E.V. Noninvasive diagnostics of black cancer and other

skin neoplasms using the method of near-field microwave sounding. *Journal of radio electronics*, no 1, 2015. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/3/text.html> (accessed: December 20, 2018).

7. Golosovsky M., Davidov D. Newel millimeter wave near-field resistivity microscope. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 68, no. 11, pp. 1579–1581.

8. Nozokido T., Bae J., Mizino K. Scanning near-field millimeter-wave microscopy using a metal slit as a scanning probe. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, 2001, vol. MTT-49, no. 3, pp. 491–499.

9. Martínez C., Coello V., Cortés R., Villagómez R. Evanescent Microwave Microscopy. *J. Korean Phys. Soc.*, 2005, vol. 47, pp. 152–156.

10. Tabib-Azar M., Su D.-P., Pohar A. 0.4  $\mu\text{m}$  spatial resolution with 1 GHz ( $\lambda = 30$  cm) evanescent microwave probe. *Rev. Sci. Instrum*, 1999, vol. 70, no. 3, pp. 1725–1729.

11. Reznik A.N. Kvazistacionarnoe pole teplovogo izlucheniya v teorii kontaktnoj radiotermometrii [Quasi-stationary field of thermal radiation in the theory of contact radiometry]. *Izv. vuzov. Radiofizika*, 1991, vol. 34, no 5, pp. 512–517 (in Russ.)

12. Belichenko V.P., Zapasnoy A.S. Skhemnoe reshenie blizhnepol'nogo mikrovolnovogo interferencionnogo mikroskopa [The schematic of a near-field microwave interference microscope]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*, 2015, vol. 58, no. 10/3, pp. 62–65 (in Russ.)

13. Belichenko V.P., Zapasnoy A.S., Shestakov P.V. Control of the Magnitude and Spatial Distribution of Interference Energy Flows in Near Fields of Systems of Identical Radiators. *Optics and Spectroscopy*, 2015, vol. 118, no. 4, pp. 605–608.

14. Reznik A.N., Yurasova N.V. Obnaruzhenie kontrastnykh obrazovaniy vnuti biologicheskikh sred pri pomoshchi blizhnepol'noj SVCH diagnostiki [Detection of contrast formations inside biological media using near-field microwave diagnostics]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2006, vol. 76, no 1, pp. 90–104 (in Russ.)

15. Reznik A.N., Yurasova N.V. Electrodynamic of microwave near-field probing: Application to medical diagnostics. *J. Appl. Phys*, 2005, vol. 98, pp. 114701(1)–114701(9).

---

#### Victor P. Belichenko

Doctor of Physics and Mathematics, Professor  
Department of Radiophysics,  
National Research Tomsk State University (NI TSU).  
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-34-63  
Email: [bvp@mail.tsu.ru](mailto:bvp@mail.tsu.ru)

#### Aleksander S. Mironchev

Candidate of Physics and Mathematics,  
Engineer Department of Radiophysics, NI TSU  
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-34-63  
Email: [mironchev42@mail.ru](mailto:mironchev42@mail.ru)

#### Andrey V. Klokov

Candidate of Physics and Mathematics,  
Associate Professor Department of Radiophysics NI TSU  
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-34-63  
Email: [701-kav@mail.tsu.ru](mailto:701-kav@mail.tsu.ru)

#### Andrey S. Zapasnoy

Candidate of Physics and Mathematics,  
Associate Professor Department of Radiophysics NI TSU  
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-961-095-96-97  
Email: [zas\\_rff@live.com](mailto:zas_rff@live.com)

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И ИНФОРМАТИКА**



УДК 004.9

К.В. Курносков

## Методика оценки безопасности информационных систем, построенных с использованием технологий виртуализации

Защита виртуальных сегментов информационных систем является актуальной проблемой для компаний, использующих технологии виртуализации. Обеспечение информационной безопасности виртуализации является одним из приоритетных направлений в развитии ИТ-рынка России. В данной работе проанализированы существующие методики оценки безопасности и кратко описана собственная методика оценки безопасности информационных систем, построенных с использованием технологий виртуализации, разработанная с учетом выявленных недостатков у существующих на данный момент. Модель, на которой основывается данная методика, может быть использована при оценке безопасности более широкого круга информационных систем.

**Ключевые слова:** виртуализация, виртуальная инфраструктура, виртуальная машина, гипервизор, информационная безопасность, уязвимости виртуализации, идентификация угроз, модель угроз.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-37-44

По оценкам компании Veeam [1], IDC [2] и Cisco [3], мировой рынок виртуализации продолжает развиваться очень быстрыми темпами, а в России это одна из самых стремительно развивающихся областей ИТ-рынка. В утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р программе «Цифровая экономика Российской Федерации» [4], подписанной Председателем Правительства Д.А. Медведевым, отмечается, что рынок «облачных услуг», в основе которых лежит использование технологий виртуализации, растет на 40% ежегодно. Но в отличие от большинства стран Россия не имеет стандартов оценки безопасности в этой сфере. При этом количество преступлений в цифровой среде за последние три года возросло на 75%.

Информационную безопасность, согласно этой программе, относят к одному из пяти базовых направлений развития цифровой экономики, а для решения проблем роста киберпреступности предлагается совершенствовать систему информационной безопасности во всех секторах экономики. Одним из основных препятствий на данном пути развития называют нерешенные проблемы при обеспечении информационной безопасности в сложных иерархических информационно-телекоммуникационных системах, широко использующих виртуализацию.

К таким проблемам относятся: 1) недостаточная нормативная база обеспечения безопасности ИС, использующих технологии виртуализации; 2) дефицит методического обеспечения для построения систем защиты и оценки уровня защищенности систем, использующих технологии виртуализации; 3) оценка уровня доверия к платформам виртуализации и разработанным для них средствам защиты.

Для решения этих проблем в дорожной карте реализации работ по направлению «Информационная безопасность» выделяются такие вехи как: 1) разработка проектов стандартов информационной безопасности объектов информационной инфраструктуры; 2) определение методики оценки показателей информационной безопасности на сетях связи;

3) законодательное закрепление требований к устойчивости и безопасности сетей связи и оборудования; 4) разработка и внедрение национальных стандартов в области информационной безопасности в системах, реализующих облачные, туманные и прочие технологии, построенные с использованием систем виртуализации.

Таким образом, результаты данной работы могут внести некоторый вклад в реализацию программы «Цифровая экономика».

Анализ текущего состояния нормативно-методического обеспечения в сфере безопасности виртуальных инфраструктур позволяет выделить следующие проблемы, связанные с нормативно-методической базой и стандартизацией.

По результатам анализа существующих российских и международных методик по определению угроз и оценке безопасности в информационных системах разного назначения [5–14] были сделаны следующие выводы.

Во-первых, существующие методики позволяют получить статическую оценку системы в определенный момент времени и не учитывают изменения в инфраструктуре и (или) внешней среде. Данная оценка не может считаться актуальной после даже незначительных изменений, примерами которых являются установка обновлений, замена программного обеспечения, публикация информации о новых методах атак, изменение уровня важности защищаемой информации. Пересчет показателей при подобных изменениях выполняется вручную, являясь достаточно трудоёмким даже для высококвалифицированных специалистов.

Во-вторых, компоненты системы в данных методиках рассматриваются как отдельные элементы. Не учитывается специфическая связь между объектами, присущая виртуальным инфраструктурам, и влияние реализации одних угроз на возможность реализации других. Например, компрометация гипервизора практически всегда будет нести за собой компрометацию виртуальных машин, управляемых им.

В-третьих, основным критерием оценки угроз является субъективная оценка экспертов. Такой подход к оценке рассматривает угрозу как отдельную сущность, а не взаимосвязанный набор компонентов, из которых она сформирована, что ограничивает возможность формализации и математических обобщений [6].

В данной работе сформулированы требования, которым должна отвечать методика оценки безопасности информационных систем, функционирующих на базе технологий виртуализации.

#### **Пространство понятий**

Нередко встречается ситуация, когда методики оперируют понятиями, которые в разных документах интерпретируются по-разному. Примером может являться подход к понятию «угроза безопасности информации», которое имеет различные толкования. В методическом документе «Меры защиты информации в ГИС» [5] компонентами угрозы являются: возможности нарушителя, уязвимость информационной системы, способ реализации и последствия от реализации. В проекте методики определения угроз безопасности ФСТЭК [6], помимо вышеперечисленных компонентов, появляется еще один: объект воздействия. Несмотря на то, что определение этого понятия стало более полным и точным, это идет вразрез с классической терминологией, данной в ГОСТ Р 50922–2006 [15]. Существуют и другие подходы к определению понятия «угроза» [16].

Соответственно, для корректного применения данных методик, необходимо изначально определить границы соответствия терминологии некому подходу или стандарту.

#### **Формализация**

Методика должна оперировать понятиями, подающимися математической формализации и состоящими из простых элементов, допускающих количественные оценки или имеющих качественные характеристики, представленные конечными списками возможных состояний. Итоговые оценки должны присваиваться путем математических расчетов по представленным формулам и на основе конкретно определенных исходных данных. Количество исходных параметров, основанных на экспертных оценках, должно быть сведено к минимуму.

#### **Спецификация**

Методика оценки безопасности информационных систем, построенных на базе виртуальных инфраструктур, должна учитывать их специфику. Виртуализация имеет принципиальные отличия от технологий, работающих на физических объектах. Многие особенности, такие как наличие гипервизора, моментальных снимков (снапшотов) или эталонных образов, не имеют аналогов в обычных информационных системах, поэтому некорректно оценивать их безопасность по общим методикам.

#### **Взаимосвязанность**

При использовании технологий виртуализации многие компоненты взаимосвязаны гораздо теснее, чем компоненты обычных информационных систем.

Такие компоненты, как гипервизор, виртуальная машина, виртуальная сеть, невозможно рассматривать изолированно ввиду их технологической реализации. Любые угрозы, настройки и изменения в одном из компонентов имеют значительное влияние на смежные компоненты. Важной особенностью является то, что одни самостоятельные объекты являются просто данными для других, являющихся их носителями [17].

#### **Динамичность**

Информационная система и внешняя среда не являются статическими объектами. Регулярно обнаруживаются новые уязвимости программного обеспечения, появляются новые методы атак, выходят обновления и патчи, способные за несколько недель значительно изменить функционал платформ виртуализации. Важность информации и ее свойств тоже не является постоянной величиной. Если речь идет о реальном обеспечении безопасности, а не о разовом выполнении нормативных требований при аттестации, то методика должна иметь механизмы, позволяющие с минимальными затратами ресурсов актуализировать оценку уровня безопасности информационных систем «на лету». На практике это означает, что методика должна иметь возможность автоматизации процесса оценки при изменении объекта или внешней среды.

Соблюдение данных требований является необходимым условием для качественного улучшения методик оценки показателей информационной безопасности в информационных системах, построенных с применением технологий виртуализации.

Ниже приведена сравнительная характеристика некоторых из наиболее распространенных методик по предложенным критериям (табл. 1).

Полученные данные дают представление о сильных и слабых сторонах рассмотренных методик оценки безопасности виртуальной инфраструктуры и позволяют определить основные направления их совершенствования с целью создания удовлетворяющей данным требованиям методики и основанной на ней автоматизированной системы оценки безопасности информационных систем, построенных на технологиях виртуализации.

Разработанный алгоритм оценки защищенности ИС состоит из следующих этапов: 1) идентификация защищаемой информации; 2) ранжирование информации по уровням важности; 3) идентификация носителей защищаемой информации – объектов защиты; 4) определение необходимого состояния объекта, которое будет считаться безопасным; 5) определение множества состояний, в которые может перейти объект из состояния, считающегося безопасным; 6) идентификация угроз, реализация которых может привести к изменению безопасного состояния объекта; 7) определение требований безопасности для объектов защиты; 8) оценка соответствия системы защиты предъявляемым требованиям; 9) составление рекомендаций для повышения уровня защищенности ИС.

Сравнение методик по представленным требованиям

Название методики или подхода	Пространство понятий	Формализация	Спецификация	Взаимосвязанность	Динамичность
Cloud Computing Risk Assessment [18]	Использует термины Европейского агентства сетевой и информационной безопасности	Конечные списки, количественные оценки, экспертные оценки	Учитывается	Отсутствует	Статична
Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах [6]	Предлагаются собственные определения, выходящие за рамки ГОСТ Р 56938–2016 [19] и ГОСТ Р 50922–2006 [15]	Использован банк угроз безопасности, конечные списки	Универсальная	Отсутствует	Статична
ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 13335-3–2007. Методы и средства обеспечения безопасности [9]	Использует термины ИСО/МЭК	Конечные списки, количественные оценки, экспертные оценки	Универсальная	Присутствует	Статична
Попов А.М., Золотарев В.В., Бондарь И.В. Методика оценки защищенности информационной системы по требованиям стандартов информационной безопасности [10]	Использует термины ИСО/МЭК	Количествен. оценка, использование двоичной логики, экспертные оценки	Универсальная	Отсутствует	Статична

### Идентификация защищаемой информации

Идентификация защищаемой информации – это первый шаг при построении системы защиты и оценки защищенности ИС. Первоначально определяется перечень конфиденциальной информации, подлежащей защите в соответствии с требованием текущего законодательства в области защиты информации. Далее включается информация, подлежащая защите на основе внутренних документов организации, коммерческая тайна и прочая информация, отнесенная организацией к защищаемой. На практике основным способом определения перечня защищаемой информации является организация работы экспертной комиссии в организации. Более подробно о различных методах идентификации информации написано в работах Н.В. Гришиной [20], Г.Г. Камаловой [21], А.А. Караваевой [22].

### Ранжирование информации по уровням важности

На основе списка идентифицированной защищаемой информации экспертная комиссия определяет важность сохранения свойств каждого информационного ресурса для организации и непосредственную его ценность. В рамках предлагаемой методики можно использовать любую количественную оценку важности – как базовую с рангами: 1 – «неважная», 2 – «важная», 3 – «критически важная», так и более сложные градации. Способы оценки важности информации и ее свойств в своих работах предлагали В.Е. Ходаков, В.Н. Козел [23], А.Ф. Чипига [24]; И.Ю. Нежданов [25].

### Идентификация носителей защищаемой информации

Идентификация носителей защищаемой информации является важным шагом при оценке защищенности.

Носитель может быть как физическим устройством (жесткий диск, сетевой кабель), так и логиче-

ским объектом (виртуальный жесткий диск, пакет данных, оперативная память виртуальной машины). В рамках данной работы носителем будет считаться как конечный объект (компонент виртуальной инфраструктуры), на котором происходит хранение информации, так и промежуточные объекты, через которые информация передается.

Нельзя не отметить, что носители обладают своей иерархией, например, физический носитель может содержать несколько логических носителей, которые, в свою очередь, могут содержать другие логические носители. Таким образом, выстраивается «пирамида», в основании которой находится физический носитель, а каждая последующая логическая сущность последовательно надстраивается на него и является просто информацией по сравнению с предыдущей ступенью. Следовательно, для полноты модели нельзя не учитывать такой вид информации (рис. 1).



Рис. 1. Иерархия носителей информации

На первом этапе определяется статическое место хранения всей идентифицированной защищаемой информации. Это позволяет определить конечные объекты защиты. На втором этапе на основе бизнес-процессов, связанных с обработкой защищаемой информации, определяются пути движения информации в границах информационной системы, построенной с использованием технологий виртуализации. На основе карт перемещения информации в процессе ее обработки определяются ресурсы, вы-



ступающие носителями информации при ее движении. На третьем шаге определяются носители, выступающие родительскими по отношению к ресурсам виртуализации в информационной системе. В качестве примера рассмотрим процесс доступа к

условному файлу, содержащему конфиденциальную информацию пользователем информационной системы посредством удаленного доступа к виртуальной машине, на которой этот файл расположен (рис. 2).



Рис. 2. Процесс доступа пользователя к файлу

Таким образом, видно, что при обработке файла с защищаемой информацией его носителем выступает не один объект – виртуальный жесткий диск, а некоторое множество. При этом изменение безопасного состояния любого из носителей приведет к изменению свойств информации в самом защищаемом файле. Следовательно, оценивать нужно не только безопасность конечного носителя, но и всех, участвующих в процессе обработки.

#### Определение безопасного состояния объекта

На основе результата сопоставления уровня важности свойств информации и носителей, на которых она располагается при хранении и обработке составляется таблица соответствия состояния информации и состояния носителя, при котором может быть достигнуто требуемое состояние информации. Каждому состоянию информации соответствует однозначно определенное состояние носителя этой информации (табл. 2).

Таблица 2

Соответствие состояния информации с состоянием ее носителя

Состояние информации	Состояние физической компоненты носителя	Состояние логической компоненты носителя
Конфиденциальность информации	Доступность чтения только разрешенными интерфейсами*	Доступность чтения носителя только для легитимных функций, запущенных легитимным пользователем
Целостность информации	Доступность записи только разрешенными интерфейсами	Доступность записи на носитель только для легитимных функций, запущенных легитимным пользователем
Доступность информации	Наличие функционирующего физического канала связи с пользователем информации**	Наличие функционирующего логического канала связи информации с легитимным пользователем

\* Интерфейс системы, предназначенный для взаимодействия с этим носителем.

\*\* Как конечный пользователь, так и любой элемент системы, использующий эту информацию.

#### Определение множества состояний, в которые может перейти объект из состояния, считающегося безопасным

Опираясь на табл. 2, можно заключить, что для обеспечения безопасности информации требуется

обеспечение поддержания определенного состояния носителей этой информации. Выход из этого состояния и переход в состояние, которое не является безопасным, возможен при реализации некоторых условий перехода. Для моделирования таких переходов был использован аппарат ингибиторных сетей Петри (рис. 3).

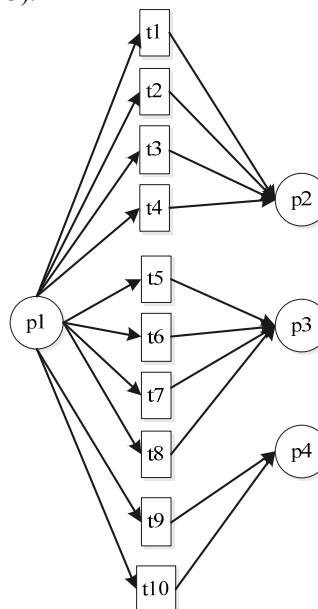


Рис. 3. Модель выхода объекта из безопасного состояния

Состояние p1 определяется как безопасное состояние объекта. Условия перехода в другие конечные состояния объекта при осуществлении перехода представлены ниже (табл. 3).

#### Идентификация угроз, реализация которых может привести к изменению безопасного состояния объекта

Для решения задач идентификации и построения модели угроз безопасности информационных систем в настоящий момент используются следующие подходы: 1) модели, построенные на основе сетей Петри; 2) геометрические модели; 3) нечеткие продукционные модели; 4) математический анализ устойчивости систем; 5) теоретико-множественный подход; 6) нечеткие когнитивные карты.

Любая реализация угрозы информационной безопасности предполагает следующую последовательность событий.

Таблица 3

## Условия перехода объекта в небезопасные состояния

Состояние объекта	Переход	Условия перехода
p2 Доступность чтения носителя для нелегитимных функций или функций, запущенных нелегитимным пользователем	t1	Несанкционированный доступ на чтение – доступ, не предусмотренный политиками доступа
	t2	Переполнение буфера – обращение к участкам памяти, не предназначенным для чтения информации этим пользователем
	t3	Повышение прав доступа – запуск функций с правами, не предоставленными пользователю, инициирующему запуск
	t4	Получение доступа на чтение пользователем после нелегитимного изменения матрицы доступа
p3 Доступность записи на носитель только для нелегитимных функций или функций, запущенных нелегитимным пользователем	t5	Несанкционированный доступ на запись – доступ с возможностью внесения изменений, не предусмотренный политиками доступа
	t6	Переполнение буфера – обращение к участкам памяти, не предназначенным для записи информации этим пользователем
	t7	Повышение прав доступа – запуск функций с правами на запись, не предоставленными пользователю, инициирующему запуск
	t8	Получение доступа на запись пользователем после нелегитимного изменения матрицы доступа
p3 Нарушение функционирующего логического канала связи информации с пользователем информации	t9	Атака типа «отказ в обслуживании», вызывающая исчерпание вычислительных ресурсов носителя
	t10	Изменение конфигурации носителя, влекущее невозможность его взаимодействия с пользователем информации

Источник угрозы через канал взаимодействия с одним из компонентов виртуальной инфраструктуры (это может быть как физический, так и логический объект) совершает некоторое воздействие (отправляет пакет, изменяет параметры конфигурации). Эти действия реализуют процесс, при котором система или ее компоненты меняют свое текущее состояние (в данной работе этот процесс будет называться атакой). В случае наличия у системы уязвимости атака может реализовать некое деструктивное воздействие, способное изменить некоторые свойства компонента виртуальной инфраструктуры, а следовательно, и информации, которую он содержит. Схематически этот процесс можно изобразить в виде ментальной карты (рис. 4). Подробнее этот шаг описан в ранних статьях [16, 17].

### Определение требований безопасности для объектов защиты

После идентификации всех угроз, влекущих переходы объектов из безопасного состояния в другие, необходимо определить требования, выполнение которых позволит нейтрализовать идентифицированные угрозы. Как видно из карты, представленной на рис. 4, все требования сводятся к двум видам. Для устранения угрозы можно или закрыть уязвимость объекта, или закрыть канал связи между источником угрозы и защищаемым объектом. В качестве примера разберем случай угрозы пользовательским данным, расположенным на виртуальном диске виртуальной машины, под управлением ОС Windows при использовании уязвимости MS17-010, ставшей широко известной после эпидемии вируса WannaCrypt. Угрозы можно устранить двумя путями. Во-первых, можно установить обновление «Security Update for Microsoft Windows SMB Server (4013389)» на виртуальной машине или заблокировать передачу трафика в виртуальную локальную сеть гипервизора по протоколу SMB.

### Оценка соответствия системы защиты предъявляемым требованиям

Оценка соответствия проводится последовательной проверкой выполнения требований, представленных на предыдущем шаге. Сопоставление текущих и требуемых версий программного обеспечения, проверка наличия установленных обновлений или выполнение требуемых настроек могут быть автоматизированы для ускорения процесса и получения динамично изменяющейся итоговой оценки, которая может автоматически пересчитываться при изменении инфраструктуры или добавлении новых требований безопасности.

### Составление рекомендаций для повышения уровня защищенности

Рекомендации составляются на основе результатов оценки соответствия системы защиты предъявленным требованиям. Данный процесс также может быть автоматизирован.

Таким образом, в данной работе в сжатом виде представлено упрощенное представление методики оценки безопасности информационных систем, построенных с использованием технологий виртуализации. Данная методика имеет высокий уровень формализации, позволяющий получить качественные оценки параметров угрозы и автоматизировать процесс оценки. Автоматизация позволит динамически пересчитывать полученные результаты при изменении внешней среды или компонентов системы. Объекты в модели тесно взаимосвязаны, и анализ производится с учетом этих связей, учитывающих особенности использования технологий виртуализации.

### Заключение

Также учитывается рекурсивная последовательность, при которой для реализации угрозы необходим канал связи (объект виртуальной платформы), который, в свою очередь, может быть представлен как информация и ее носитель, а следовательно, для него тоже требуется определение перечня угроз.

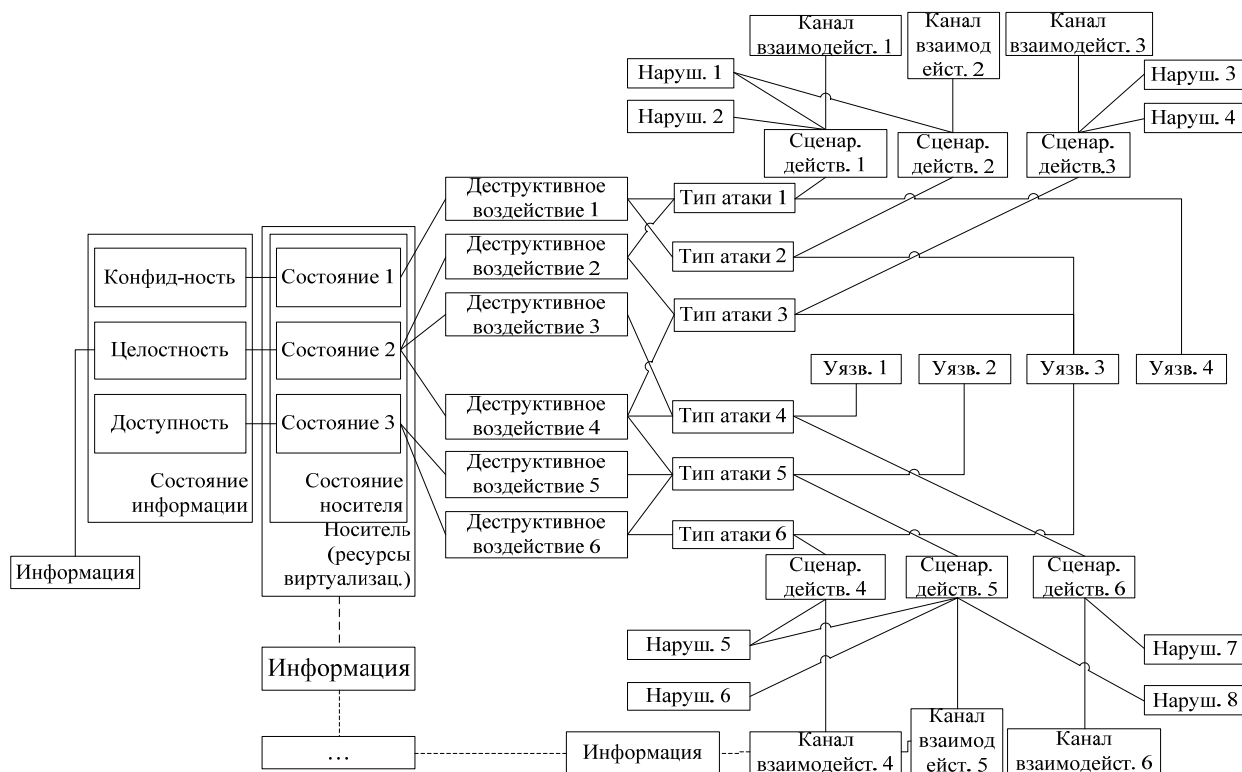


Рис. 4. Ментальная карта понятия «угроза»

### Литература

1. Ледовской В.П. Обзор средств защиты виртуальных сред VMware vSphere [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.anti-malware.ru/analytics/Virtualization\\_Security](http://www.anti-malware.ru/analytics/Virtualization_Security), свободный (дата обращения: 13.05.2018).
2. Гаврилов Д.А. Russian Cloud Services Market 2017–2021 Forecast and 2016 Vendor Shares [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://idcrussia.com/ru/research/published-reports/65018-russian-cloud-services-market-2017-2021-forecast-and-2016-vendor-shares/2-abstract>, свободный (дата обращения: 13.05.2018).
3. Virtual Security In The Data Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/unified-fabric/tap\\_virtual\\_security\\_032012.pdf](http://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/unified-fabric/tap_virtual_security_032012.pdf), свободный (дата обращения: 13.05.2018).
4. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утв. распоряжением Председателя Правительства Российской Федерации от 28.07. 2017 г. № 1632-р. – М., 2017. – 88 с.
5. Меры защиты информации в государственных информационных системах: методический документ ФСТЭК России, утв. 2014-02-11. – М., 2017. – 176 с.
6. Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах: проект методического документа ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/component/attachments/download/812> (дата обращения: 13.05.2018).
7. Определение актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах (ИС) персональных данных: методический документ ФСТЭК России, утв. 2008-02-14. – М., 2008. – 10 с.
8. Определение актуальных угроз безопасности информации в ключевых системах информационной инфраструктуры: методический документ ФСТЭК России (ДСП), утв. 2008.11.18.
9. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 13335-3–2007. Методы и средства обеспечения безопасности. – Ч. 3. – Введ. 2007-06-07. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – 49 с.
10. Попов А.М. Методика оценки защищенности информационной системы по требованиям стандартов информационной безопасности / А.М. Попов, В.В. Золотарев, И.В. Бондарь // Информатика и системы управления. – 2010. – Т. 4, вып. 26. – С. 3–12.
11. Барабанов А.В. Методический аппарат оценки соответствия автоматизированных систем требованиям безопасности информации / А.В. Барабанов, А.С. Марков, В.Л. Цирлов // Спецтехника и связь. – 2011. – Вып. 3. – С. 48–53.
12. Еременко В.Т. Автоматизация процесса оценки состояния защищенности объекта информатизации с использованием ингибиторных, вероятностных и раскрашенных сетей Петри от утечки информации / В.Т. Еременко, М.Ю. Рытов, А.П. Горлов // Информация и безопасность. – 2015. – Т. 18, вып. 1. – С. 123–126.
13. Плетнев П.В. Методика оценки рисков информационной безопасности на предприятиях малого и среднего бизнеса / П.В. Плетнев, В.М. Белов // Доклады ТУСУР. – 2012. – Т. 1, вып. 25. – С. 83–86.
14. Баранова Е.К. Методика анализа рисков информационной безопасности с использованием нечеткой логики на базе инструментария Matlab / Е.К. Баранова, А.М. Гусев // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – Т. 1, вып. 13. – С. 88–96.
15. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения. – Введ. 2006-12-27. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 12 с.
16. Курносов К.В. Системный анализ угроз безопасности информации, обрабатываемой виртуальными инфраструктурами // Матер. 54-й Междунар. науч. студенческой конф. МНСК–2016. – Новосибирск: Новосиб. нац. исслед. гос. ун-т, 2016. – С. 32.

17. Курносов К.В. Модель идентификации угроз виртуальной инфраструктуры // Матер. VII Всерос. молодежной школы-семинара по проблемам информационной безопасности «Перспектива-2016». – Таганрог: ЮФУ, 2016. – С. 11–17.

18. Catteddu D. Cloud Computing Risk Assessment / D. Catteddu, G. Hogben et al. – Heraclion: Greece, 2009. – 125 p.

19. ГОСТ Р 56938–2016. Защита информации при использовании технологий виртуализации. – Введ. 2016-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 2016. – 36 с.

20. Гришина Н.В. Организация комплексной системы защиты информации. – М.: Гелиос АРВ, 2007. – 256 с.

21. Камалова Г.Г. О способе отнесения сведений к информации ограниченного доступа // Вестник Удмурт. ун-та. – 2015. – Т. 25, вып. 2. – С. 107–111.

22. Караваев А.А. О «перечне сведений конфиденциального характера» в системе нормативно-правового регулирования конфиденциальной информации // Вестник Воронеж. гос. ун-та. – 2015. – Т. 3, вып. 16. – С. 155–160.

23. Ходаков В.Е. Оценка эффективности информационных систем по частным показателям / В.Е. Ходаков, В.Н. Козел // Научный журнал «Компьютерно-интегрированные технологии: освіта, наука, виробництво». – 2017. – Т. 1, вып. 26. – С. 159–163.

24. Чипига А.Ф. Основы построения и системного анализа комплексных систем обеспечения информационной безопасности: учеб. пособие. – Ставрополь: СКФУ, 2014. – 198 с.

25. Нежданов И.Ю. Аналитическая разведка для бизнеса. – М.: Ось-89, 2008. – 336 с.

#### Курносов Кирилл Викторович

Аспирант каф. информационной безопасности (ИБ) Новосибирского государственного университета экономики и управления (НГУЭУ)  
Каменская ул., 56, г. Новосибирск, Россия, 630099  
Тел.: +7-913-753-21-81  
Эл. почта: k.v.kurnosov@nsuem.ru

Kurnosov K.V.

#### Methodology for assessing the security of information systems built using virtualization technologies

Protecting virtual segments of information systems is an urgent problem for companies that use virtualization technologies. Ensuring information security of virtualization is one of the priority directions in the development of the IT market in Russia. In this paper, the existing methods for assessing security are analyzed and the new methodology for assessing the security of information systems built using virtualization technologies and developed taking into account the identified shortcomings in existing ones, is briefly described. The model the methodology is based on can be used to assess the security of a wider range of information systems.

**Keywords:** virtualization, virtual infrastructure, virtual machine, hypervisor, information security, virtualization vulnerabilities, threat identification, threat model.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-37-44

#### References

1. Ledovskoj V.P. Overview of protection of virtual environments VMware vSphere. – Access mode: [http://www.anti-malware.ru/analytics/Virtualization\\_Security](http://www.anti-malware.ru/analytics/Virtualization_Security), free (accessed: May 13, 2018) (in Russ.).

2. Gavrilov D. A. Russian Cloud Services Market 2017–2021 Forecast and 2016 Vendor Shares – Access mode: <http://idcrussia.com/ru/research/published-reports/65018-russian-cloud-services-market-2017-2021-forecast-and-2016-vendor-shares/2-abstract>, free (accessed: May 13, 2018) (in Russ.).

3. Virtual Security in The Data Center – Access mode: [http://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/unified-fabric/tap\\_virtual\\_security\\_032012.pdf](http://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/unified-fabric/tap_virtual_security_032012.pdf), free (accessed: May 13, 2018) (in Russ.).

4. The program «Digital economy of the Russian Federation»: approved by the order of the Chairman of the Government of the Russian Federation dated July 28, 2017, №1632-p, М., 2017, 88 p. (in Russ.).

5. Measures to protect information in state information systems: a methodological document of the FSTEC of Russia. М., 2017, 176 p. (in Russ.).

6. Methods for determining threats to the security of information in information systems: a draft methodological document of the FSTEC of Russia. Access mode: <https://fstec.ru/component/attachments/download/812> (accessed: May 13, 2018) (in Russ.).

7. Determination of actual threats to the security of personal data when they are processed in personal data information systems (IS): a methodological document of the FSTEC of Russia. Moscow, 2008, 10 p. (in Russ.).

8. Determination of actual threats to the security of information in key information infrastructure systems: a methodological document of the FSTEC of Russia (DSP). Approved. 2008-11-18 (in Russ.).

9. GOST R ISO / IEC 13335-3–2007. Methods and means of security. Part 3. Moscow, 2007, 49 p. (in Russ.).

10. Popov A.M., Zolotarev V.V., Bondar I.V. Methodology for assessing the security of an information system according to the requirements of standards of information security. *Computer Science and Control Systems*, 2010, vol. 4, no. 26, p. 3–12 (in Russ.).

11. Barabanov A.V., Markov A.S., Tsirlon V.L. Methodical apparatus for assessing the compliance of automated systems with information security requirements. *Special equipment and communication*, 2011, vol. 3, p. 48–53 (in Russ.).

12. Eremenko V.T., Rytov M.Yu., Gorlov A.P. Automating the process of assessing the state of protection of an informatization object using inhibitory, probabilistic and colored Petri nets from information leakage. *Information and Security*, 2015, vol. 18, no. 1, p. 123–126 (in Russ.).

13. Pletnev P.V., Belov V.M. Methodology for assessing information security risks in small and medium-sized enterprises. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, vol. 1, no. 25, p. 83–86 (in Russ.).

14. Baranova E.K., Gusev A.M. Information security risk analysis technique using fuzzy logic based on Matlab tools. *Educational Resources and Technologies*, 2016, vol. 1, no. 13, p. 88–96 (in Russ.).

15. GOST R 50922–2006 «Information Security. Basic terms and definitions». М., 2008, 12 p. (in Russ.).

16. Kurnosov K.V. System analysis of threats to the security of information processed by virtual infrastructures // *Proceedings of the 54th International Scientific Student Conference ISSC–2016*, 2016, p. 32. (in Russ.).

17. Kurnosov K.V. Model of identifying threats to the virtual infrastructure. *Proceedings of the VII All-Russian Youth School-Seminar on Information Security Issues «Perspective 2016»*, Taganrog: SFU, 2016, p. 11–17 (in Russ.).

18. Catteddu D., Hogben G. et al. Cloud Computing Risk Assessment. – Heraclion: Greece, 2009, 125 p.

19. GOST R 56938–2016 «Information Security in the Use of Virtualization Technologies». M., 2016, 36 p. (in Russ.).

20. Grishina N. Organization of an Integrated Information Protection System. Moscow, Helios ARV, 2007, pp. 60–66 (in Russ.).

21. Kamalova G.G. On the method of attributing information to the information of limited access. *Bulletin of Udmurt University*, 2015, vol. 25, no. 2, pp. 107–111 (in Russ.).

22. Karavayev A.A. On the «list of confidential information» in the system of regulatory and legal regulation of confidential information. *Bulletin of Voronezh State University*, 2015, vol. 3, no. 16, p. 155–160 (in Russ.).

23. Khodakov V.E., Kozel V.N. Evaluation of the effectiveness of information systems on private indicators. *Scientific journal «Computer-integrated technologies: science and technology»*, 2017, vol. 1, no. 26, p. 159–163 (in Russ.).

24. Chipiga A.F. Basics of building and system analysis of integrated information security systems: studies. Manual. – Stavropol: SKFU, 2014, 198 p. (in Russ.).

25. Nezhdanov I.Yu. Analytical intelligence for business. Moscow, Os-89, 2008, 336 p. (in Russ.).

---

**Kirill V. Kurnosov**

Graduate student of Novosibirsk State University of Economics and Management (NSUEM)  
56, g, Kamenskaya st., Novosibirsk, Russia, 630099  
Phone: +7-913-753-21-81  
Email: k.v.kurnosov@nsuem.ru

УДК 004.056.55

Д.Р. Григорян, Н.В. Нги

## Влияние группы инерции S-блока на дифференциальную характеристику блочного шифра

Представлены результаты проверки влияния группы инерции подстановок на дифференциальную характеристику композиции линейных и нелинейных узлов, используемых в распространенных блочных шифрах. Показана зависимость, позволяющая сделать вывод о предпочтительном использовании подстановок с малой группой инерции по отношению к аффинным преобразованиям.

**Ключевые слова:** S-блок, аффинные преобразования, группа инерции, дифференциальная характеристика.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-45-49

Нелинейность элементов, составляющих симметричные блочные криптосхемы, в большей степени влияет на стойкость подсистемы защиты информации в современных телекоммуникационных системах. Выбор качественных подстановок (S-блоков) считается наиболее сложной стороной разработки блочного шифра. На сегодняшний день существующий инструментарий оценки стойкости подстановок не содержит метода, определяющего наилучший S-блок по противодействию различным методам криптографического анализа и способам их аппаратной и/или программной реализации [1, 2].

В современных алгоритмах (AES, «Кузнечик») вместо фиксированных перестановок применяются линейные отображения, изменяющие установленный S-блок (часто единственный) на другой из достаточного большого множества ему эквивалентных.

В данной работе предпринята попытка определения подстановки (S-блока), которая в соответствующих шифрах даст минимальное значение дифференциальной характеристики.

### Аффинно-эквивалентное преобразование S-блока

Сначала необходимо ответить на вопрос, как много можно получить S-блоков, аффинно-эквивалентных заданному? Рассмотрим S-блок, полученный путем обращения элементов векторного пространства  $V_4$  по модулю примитивного полинома  $h(x)$  четвертой степени, аналогично методике, описанной в [2], и запишем его в табл. 1.

Таблица 1

Пример представления S-блока

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	1	9	E	D	B	7	6	F	2	C	5	A	4	3	8

Аффинно-эквивалентными (Affine General Linear Group, AGL) будут все подстановки, полученные из заданной  $R_0$  (назовем ее представителем) в соответствии с выражением (1):

$$S = \mathbf{B} \cdot R_0 (\mathbf{A} \cdot x \oplus \mathbf{a}) \oplus \mathbf{b}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  – невырожденные матрицы размером  $n \times n$ ,  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  –  $n$ -мерные векторы [4].

Сгруппировав S-блоки, получаемые из  $R_0$  аффинно-эквивалентным преобразованием по значени-

ям матрицы  $\mathbf{A}$  и вектора  $\mathbf{a}$ , формируется модель процесса генерации множества S-блоков относительно аффинной эквивалентности (рис. 1).

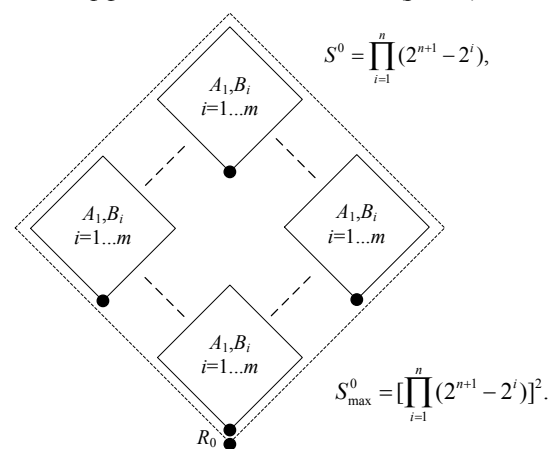


Рис. 1. Модель процесса генерации множества S-блоков относительно аффинной эквивалентности

На рис. 1 все множество аффинно-эквивалентных S-блоков  $S^0$  показано пунктирной линией. Ромбами внутри показаны подмножества S-блоков, имеющие при получении из  $R_0$  одинаковые матрицы  $\mathbf{A}_1$ , векторы  $\mathbf{a}$  и все возможные значения матрицы  $\mathbf{B}_j$  и векторы  $\mathbf{b}$ . То есть смежные классы аффинно-эквивалентных подстановок. Точки внизу ромбов – минимальные представители данных подмножеств или локальные представители данного смежного класса. Точка внизу рисунка – искомый представитель  $R_0$  всего множества [5, 6].

Как и в [4], S-блок, имеющий  $n$  входов, представляется в виде таблиц истинности составляющих его координатных булевых функций [7]. Основным отличием является подход к взвешиванию S-блоков: в данном случае таблица истинности, формирующая S-блок, рассматривается по столбцам, т.е. как  $n$  цифр системы счисления с основанием  $M = 2^{2^n}$ . Младший разряд этого числа определяется первой координатной функцией, старший  $n$ -й. Таким образом, представителем  $R_0$  всего множества аффинно-эквивалентных S-блоков является тот, у которого минимальное значение веса. Локальным представи-

телем является  $S$ -блок, обладающий наименьшим весом из всех  $S$ -блоков, полученных при всех возможных значениях матрицы  $\mathbf{B}$  и вектора  $\mathbf{b}$ , при фиксированных значениях матрицы  $\mathbf{A}$  и вектора  $\mathbf{a}$ .

#### Определение числа представителей

Для фиксированных матриц  $\mathbf{A}$  и векторов  $\mathbf{a}$ , путем перебора значений  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{b}$  ищется представитель с наименьшим весом. Количество различных представителей из всех полученных предлагается использовать в качестве показателя оценки качества  $S$ -блока. Обозначим это число  $N_{lm}$ , соответствующее числу представителей (локальных минимумов). Возможное количество подмножеств множества аффинно-эквивалентных  $S$ -блоков, а следовательно и представителей, не может превышать границу (2):

$$N_{lm} \leq \prod_{i=1}^n (2^{n+1} - 2^i). \quad (2)$$

Максимально возможное число представителей для различных значений  $n$  представлено в табл. 2.

Таблица 2  
Максимальное число представителей

$n$	$\max N_{lm}$
4	322560
5	319979520
6	1290157424640
7	20972799094947840
8	1369104324918194995200
16	2,191516442724341427197177313e+81

В качестве критерия оценки качества  $S$ -блоков предлагается использовать количество получаемых локальных представителей [8]. Так, множество аффинно-эквивалентных  $S$ -блоков, построенное для блока подстановки с размерностью  $n = 4$ , использованного в алгоритме «Магма», имеет существенно больше локальных представителей, чем  $S$ -блок такой же размерности, полученный путем обращения. Результаты экспериментов для различных аффинно-неэквивалентных  $S$ -блоков представлены в табл. 3. Под нелинейностью  $N_{Sbox}$  здесь и далее понимается наименьшее расстояние Хемминга координатных функций  $S$ -блока и их линейных комбинаций, от всех аффинных. Существенно нелинейными будем считать  $S$ -блоки, содержащие функции с нелинейностью, близкой к нелинейности бэнт-функций [3].

Таблица 3  
Аффинно-неэквивалентные  $S$ -блоки  $4 \times 4$

$S$ -блок	$N_{Sbox}$	$N_{lm}$
D2781EB45AF093C	0	1
0FA5C369872D4BE1	0	1
01C86F4E3DBA2975	2	5376
019EDB76F2C5A438(inv)	4	5376
0123468A5BCF7E9D	4	80640
C462A5B9E8D703F1(ГОСТ)	4	322560

Тот факт, что  $S$ -блоки, имеющие одинаковые показатели нелинейности, могут иметь значительно отличающиеся характеристики по другим показателям, например, количеству локальных представите-

лей, позволяет сделать вывод, что значение нелинейности для  $S$ -блоков не может считаться исчерпывающим показателем качества [9].

На основе выработанного показателя можно определить мощность множества  $S^0$  аффинно-эквивалентных  $S$ -блоков, полученных: из исходного линейного (на рис. 1 верхнее выражение) и  $S$ -блока, обладающего существенной нелинейностью (нижнее выражение).

Кроме того, можно оценить количество смежных классов  $N_{lm}$  во множестве  $S^0$  и путем сравнения полученной оценки с ее максимальным значением  $\max N_{lm}$ , представленным в табл. 3, и сделать вывод о качестве  $S$ -блока. Чем меньше полученная разница, тем лучше  $S$ -блок.

**Определение 1.** Коэффициентом использования множества подстановок (тела инерции)  $k_{ти}$  назовем отношение

$$k_{ти} = \frac{N_{lm}}{\max N_{lm}}. \quad (3)$$

Очевидно, что при  $k_{ти} = 1$  группа инерции соответствующей подстановки по отношению к аффинно-эквивалентным преобразованиям тривиальна (равна 1) [10].

#### Влияние характеристик $S$ -блока на значение дифференциальной характеристики блочного шифра

Разности  $\Delta x, \Delta y$  над  $F_2$  называют дифференциалом подстановки, а  $x, y$  – двоичные последовательности наборов входа и выхода подстановки.

Допустим,  $x, x'$  – наборы входа подстановки и  $y, y'$  – соответствующие наборы выхода [11]. Тогда матрицу дифференциалов подстановок составляют для удобства числовыми разностями. Разностный вектор  $\Delta x = a_1x_1 \oplus a_2x_2 \oplus a_3x_3 \oplus a_4x_4$  представляют в виде числа  $\mathbf{a} = 8a_1 + 4a_2 + 2a_3 + a_4$ . Общее количество разностных выражений – 16, каждому из которых соответствует 16 пар входных наборов  $x, x'$ . Таким же образом задают разностный вектор  $\Delta y = b_1y_1 \oplus b_2y_2 \oplus b_3y_3 \oplus b_4y_4$  соответствующим числом  $\mathbf{b} = 8b_1 + 4b_2 + 2b_3 + b_4$  [12].

Допустим, входной набор  $x$  для разности  $\mathbf{a}$  может принимать 16 значений. Для каждого  $x$  и соответствующего  $x'$  вычислим результаты подстановки и соответствующее разностное значение  $\mathbf{b}$ . Элемент  $c_{ab}$  разностной матрицы определяется числом встречаемости выходного разностного значения  $\mathbf{b}$  для входного дифференциала  $\mathbf{a}$ . Матрица разностных значений в полной мере задает как дифференциалы  $S$ -блока, так и частоту их появления (табл. 4).

Благодаря вычисленной таблице дифференциалов, легко определяются одноцикловые дифференциалы криптографического преобразования и их вероятности [13].

**Определение 2.**  $i$ -цикловым дифференциалом шифрования являются два вектора  $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]_i$ , такие, что открытые наборы текстов  $x, x'$  с разностью  $\mathbf{a}$  спо-

собны быть преобразованы после  $i$ -й итерации в выходной набор текстов  $y, y'$  с разностью  $\beta$ .

Таблица 4

Разностная матрица для S-блока из табл. 1

		Разности выходов, представленные числами (b)								
		0	1	2	3	...	C	D	E	F
Разности входов, представленные числами (a)	0	16	0	0	0	...	0	0	0	0
	1	0	0	2	2	...	0	2	2	2
	2	0	2	2	2	...	0	0	4	0
	3	0	2	2	2	...	0	4	0	0
	4	0	2	2	0	...	2	2	0	0
	5	0	0	0	0	...	2	2	2	4
	6	0	2	0	0	...	4	0	0	0
	7	0	0	0	2	...	0	2	4	2
	8	0	0	2	0	...	0	0	0	2
	9	0	2	0	0	...	0	0	2	0
	A	0	2	0	2	...	0	0	0	2
	B	0	0	0	0	...	0	2	0	2
	C	0	0	0	2	...	2	2	0	0
	D	0	0	2	0	...	2	0	2	0
E	0	2	2	2	...	0	0	0	0	
F	0	0	2	2	...	4	0	0	2	

**Определение 3.** Вероятность дифференциала  $i$ -го цикла для векторной пары  $[\alpha, \beta]_i$  – это условная вероятность равенства  $\beta$  разности  $\Delta y(i)$  двух выходных текстов  $y, y'$  после  $i$ -го цикла при условии, что  $\Delta x$  соответствующих входных наборов равна  $\alpha$ , когда входные  $x$  или  $x'$  и раундовые ключи взаимно независимы и равновероятны [3]:

$$P(\Delta y(i) = \beta | \Delta x = \alpha) . \tag{4}$$

Совместно с определением дифференциала  $i$ -го цикла известно понятие дифференциальной характеристики.

**Определение 4.** Дифференциальной характеристикой называют множество одноцикловых дифференциалов, в котором выходной дифференциал векторов одного цикла совпадает с входным дифференциалом следующего.

Рассмотрим влияние параметров S-блока на значение дифференциальной характеристики композиции линейных и нелинейных отображений (S-блок, L-преобразования) [15], основная идея которого состоит в вычислении среднего ее значения для всех полученных аффинно-эквивалентных блоков и представлена на рис. 2.

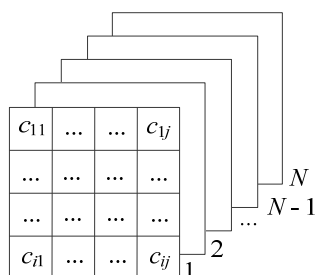


Рис. 2. Модель представления таблиц распределения дифференциалов для аффинно-эквивалентных S-блоков

При проведении опытов будем изменять только матрицы  $A$  и  $B$ , поскольку роль векторов  $a$  и  $b$  будут играть соответствующие раундовые ключи.

**Исследование дифференциальной характеристики существенно нелинейных S-блоков**

На рис. 3 приведены результаты суммирования таблиц распределения дифференциалов для S-блока, полученного путем обращения, у которого наибольший дифференциал составляет 4 [14]. Уже за пятьсот итераций алгоритма анализируемые параметры ( $\max, \min, \Delta$ , т.е. максимальное, минимальное значения полученных средних значений и разность между ними) приближаются к  $\approx 1,3; 0,8$  и  $0,5$  соответственно. Такие значения существенно меньше исходных и с увеличением числа итераций уменьшаются, но не так интенсивно, как в начале алгоритма.

Следующим этапом является применение разработанного алгоритма к S-блоку из отечественного ГОСТа «Магма». Итоги экспериментов представлены на рис. 4.

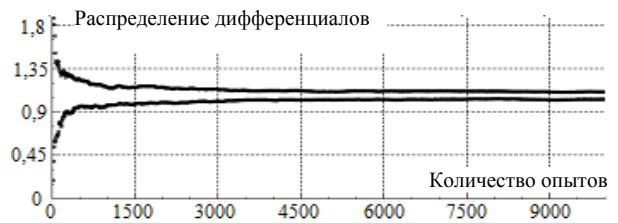


Рис. 3. Дифференциальная характеристика S-блока, полученного путем обращения

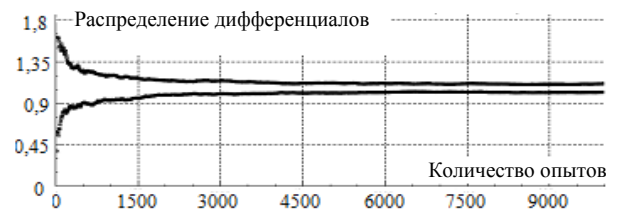


Рис. 4. Дифференциальная характеристика S-блока «Магма»

**Оценка значения максимального дифференциала S-блоков больших размерностей при их совместном использовании с линейными отображениями**

Для начала составим таблицу распределения дифференциалов. Для S-блока, полученного путем обращения (типа AES), максимальная частота дифференциала равна 4, минимальная – 0. Ниже в табл. 5 представлены результаты опытов.

Далее рассмотрим результаты, полученные для S-блока, используемого в алгоритме «Кузнечик» (табл. 6). По сравнению с американским аналогом стойкость с точки зрения дифференциального криптоанализа должна быть ниже.

Для наглядности дифференциальные характеристики композиций (S-блок, L-преобразования) представлены в табл. 7.



Таблица 5

## Результаты экспериментов для S-блоков типа AES

S-блок	$N_{sbox}$	max	min	$\Delta$	Кол-во опытов
AES	112	1,3	0,7	0,6	100
		1,2	0,84	0,36	300
		1,16	0,85	0,31	500
		1,14	0,88	0,26	700
		1,12	0,89	0,23	1000

Таблица 6

## Результаты экспериментов для S-блока «Кузнечик»

S-блок	$N_{sbox}$	max	min	$\Delta$	Кол-во опытов
ГОСТ	100	1,34	0,6	0,74	100
		1,27	0,72	0,55	300
		1,21	0,79	0,42	500
		1,17	0,81	0,36	700
		1,15	0,86	0,29	1000

Таблица 7

## Сравнение характеристик S-блоков «Кузнечик» и AES

		Количество опытов					
		1	100	300	600	900	1000
ГОСТ	max	8	1,3	1,25	1,2	1,16	1,15
	min	0	0,6	0,71	0,81	0,85	0,86
AES	max	4	1,3	1,2	1,15	1,12	1,12
	min	0	0,7	0,84	0,86	0,88	0,9

Из сравнения видно, что значение максимального дифференциала довольно быстро снижается. Сравнивая результаты с S-блоком размерности  $n = 4$ , можно увидеть, что исследуемые показатели у S-блоков с  $n = 8$  уменьшаются даже быстрее. Кроме того, несмотря на то, что исходная дифференциальная характеристика S-блока из алгоритма «Кузнечик» в два раза хуже, чем у S-блока AES, для обоих блоков замены за 100 итераций они практически равны. Данный факт объясняется тем, что группа инерции у S-блока «Кузнечик» тривиальна. В то время, как для S-блока AES, она равна  $\cong 1 \cdot 10^{13}$ .

**Выводы**

Таким образом, при построении блочных шифров необходимо использовать S-блоки с минимальной группой инерции ( $k_{in} = 1$ ) и линейные узлы, которые способны обеспечить выбор преобразования, близкий к равновероятному.

Несмотря на то, что с увеличением размера подстановки доля подстановок с тривиальной группой инерции растет, задача определения группы инерции для конкретной подстановки не тривиальна. Поэтому направлением дальнейших исследований можно считать, разработку эффективных алгоритмов оценки значения группы инерции подстановок по отношению к аффинным преобразованиям.

*Литература*

1. Панасенко С.П. Алгоритмы шифрования: специальный справочник. – БХВ-Петербург, 2009. – 576 с.
2. Зензин О.С. Стандарт криптографической защиты – AES. Конечные поля / О.С. Зензин, М.А. Иванов. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2002. – 176 с.

3. Логачев О.А. Булевы функции в теории кодирования и криптологии / О.А. Логачев, А.А. Сальников, С.В. Смышляев. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 576 с.

4. Birykov A. A Toolbox for Cryptanalysis: Linear and Affine Equi-valent Algorithms / A. Birykov, C. De Cannere, A. Braeken, B. Prenell // Advances in Cryptology: EURO-CRYPTO–2003. – Springer, 2003. – Vol. 2656. – P. 33–50.

5. Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях: пособие. – М.: ДМК-Пресс, 2012. – 592 с.

6. Изотов Б.В. Модели управляемых подстановочных операций и синтез блочных алгоритмов защиты информации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2001. – С. 22–24.

7. Wei Guo Z. Constructions of almost optimal resilient Boolean functions on large even number of variables / Z. Wei Guo, X. Guo Zhen // Information Theory IEEE Transactions on. – 2009. – P. 5822–5831.

8. Luật 51/2005/QH11 Giao dịch điện tử Vietnam. – 2005.

9. 170/2013/NĐ-CP Hướng dẫn Luật giao dịch điện tử về chữ ký số và dịch vụ chứng thực chữ ký số. – 2013.

10. Харин Ю.С. Математические основы криптографии / Ю.С. Харин, В.И. Бердник, Г.В. Матвеев. – Минск: БГУ, 1999. – 319 с.

11. Яшенко В.В. Введение в криптографию. – М.: МЦМНО, 2000. – 288 с.

12. Ростовцев Г.А. Алгебраические основы криптографии. – СПб.: НПО «Мир и семья», ООО «Интерлайн», 2000. – 354 с.

13. Чмора Л.А. Современная прикладная криптография. – М.: Гелиос АРИ, 2001. – 256 с.

14. Construction of highly nonlinear resilient S-boxes with given degree / F.U. Shaojing et al. // Designs, Codes and Cryptography. – 2012. – P. 241–253.

15. Lisitskaya I.V. Importance of S-Blocks in Modern Block Ciphers / I.V. Lisitskaya, E.D. Melnychuk, K.E. Lisitskiy // International Journal of Computer Network & Information Security. – 2012. – P. 4–10.

**Григорян Даниил Рубенович**

Сотрудник Академии федеральной службы охраны (ФСО) России

Приборостроительная ул., 35, г. Орёл, Россия, 302034

Тел.: +7 (486-2) 54-99-33

Эл. почта: daniil96grigoryan@yandex.ru

**Нги Нгуен Ван**

Адъюнкт Академии ФСО России

Приборостроительная ул., 35, г. Орёл, Россия, 302034

Тел.: +7-920-819-68-41

Эл. почта: nghinv25@gmail.com

Grigoryan D.R., Nghi N.V.

**Influence of inertia group of the S-box on the differential characteristic of the box cipher**

The article presents the testing results for various groups and substitutions on the differential characteristics of compositions of linear and nonlinear nodes in common box ciphers. A relationship is shown that allows prioritizing the use of

substitutions with a small group of inertia to the one of affine transformations.

**Keywords:** S-box, affine transformations, inertia group, differential characteristic.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-45-49

### References

1. Panasenکو S. P. *Algoritmj shivrovaniya. Specialnij spravochnik* [Encryption algorithms. Special reference]. Saint-Petersburg, BHV-Petersburg, 2009. 576 p.
2. Zenzin O.S., Ivanov M.A. *Standart criptographicheskoy zashitj AES. Konechnie polja* [Cryptographic protection standard – AES. Finite field]. M., KUDIC-OBRAZ, 2002. 176 p.
3. Logachev O.A., Salnikov A.A., Smjshlyayev S.V. *Bulevj funkzii d teorii kodirovaniya I cryptologii* [Boolean functions in coding theory and cryptology]. M., LENAND, 2015. 576 p.
4. A. Birykov, Christophe De Cannere, A. Braeken, B. Prenell. A Toolbox for Cryptanalysis: Linear and Affine Equivalent Algorithms. *Advances in Cryptology: EUROCRYPTO–2003*, 2003, vol. 2656, pp. 33–50.
5. Shangin V.F. *Zashita informacii d computernjh sistemah I setjah. Rukovodstvo* [Protection of information in computer systems and networks. Guide book]. M., DMK-Press, 2012, 592 p.
6. Izotov B. V. *Modeli upravljameh podstanovochnjh operacij i sintez blochnjh algoritmov zashitj informazii* [Models of controlled substitution operations and synthesis of block algorithms of information security. Cand. Diss. Abstract]. SPb., 2001. pp. 22–24.
7. Wei Guo Z., Guo Zhen X. Constructions of almost optimal resilient Boolean functions on large even number of variables. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 2009, pp. 5822–5831.
8. Luật 51/2005/QH11 Giao dịch điện tử Việt Nam. 2005.
9. 170/2013/NĐ-CP Hướng dẫn Luật giao dịch điện tử về chữ ký số và dịch vụ chứng thực chữ ký số. 2013.
10. Harin U.S., Berdnik V.I., Matveev G.V. *Matematicheskie osnovj cryptographii* [Mathematical foundations of cryptography]. Minsk, BGU, 1999. 319 p.
11. Jaschenko V.V. *Vvedenie v cryptographij* [Introduction to cryptography]. M., MZMNO, 2000. 288 p.
12. Rostovzev G.A. *Algebraicheskie osnovj cryptographii* [Algebraic the basics of cryptography]. SPb., NPO «Mir i semja», OOO «Interlain», 2000. 354 p.
13. Chmora L.A. *Sovremennaja prikladnaja cryptographija* [Modern applied cryptography]. M., Gelios ARI, 2001. 256 p.
14. Shaojing FU, et al. Construction of highly nonlinear resilient S-boxes with given degree. *Designs, Codes and Cryptography*, 2012, pp. 241–253.
15. Lisitskaya I.V., Melnychuk E.D., Lisitskiy K.E. Importance of S-Blocks in Modern Block Ciphers. *International Journal of Computer Network & Information Security*. 2012, pp. 4–10.

---

#### Daniil R. Grigoryan

Employee, Academy of Federal Guard Service of Russia  
35, Priborostroitel' naya st., Oryol, Russia, 302034  
Phone: +7 (486-2) 54-99-33  
Email: daniil96grigoryan@yandex.ru

#### Nguyen Van Nghi

Adjunct, Academy of Federal Guard Service of Russia  
35, Priborostroitel' naya st., Oryol, Russia, 302034  
Phone: +7-920-819-68-41  
Email: nghinv25@gmail.com

УДК 519.245

О.О. Евсютин, А.А. Шелупанов, В.Д. Бабишин, К.А. Соседко

## Непрерывная оптимизация с помощью гибридной модели клеточных автоматов и обучаемых автоматов

Представлен алгоритм непрерывной оптимизации функций многих переменных, основанный на вычислительной модели клеточного автомата с целевой функцией. Эффективность данной вычислительной модели зависит от выбора правила развития клеточного автомата. При этом использование композиций правил показывает большую эффективность по сравнению с использованием отдельных правил. Отличительной особенностью данного исследования является использование динамической композиции, формируемой в процессе развития клеточного автомата с целевой функцией. Выбор правила на каждом шаге развития клеточного автомата осуществляется с помощью вычислительной модели обучаемого автомата. Результаты вычислительных экспериментов, проведенных со стандартными тестовыми функциями, показали, что данное решение позволяет повысить точность оптимизации.

**Ключевые слова:** непрерывная оптимизация, клеточные автоматы, обучаемые автоматы, клеточный автомат с целевой функцией.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-50-54

Задачи оптимизации достаточно часто возникают в различных прикладных областях, когда требуется выбрать наилучший вариант из множества возможных. В настоящее время известно много методов решения подобных задач. Их можно разделить на два больших класса: детерминированные и стохастические. Детерминированные методы позволяют гарантировать оптимальность решения с заданной точностью, в то время как стохастические методы в общем случае не дают информации о точности найденного решения, однако на практике зачастую показывают высокую эффективность для сложных целевых функций. В связи с этим методы оптимизации, относящиеся ко второму классу, также называют эвристическими.

Значительная часть стохастических методов оптимизации основана на том, что поиск оптимального решения имитирует поведение сложных физических, биологических или социальных систем, состоящих из значительного числа взаимодействующих друг с другом однотипных элементов [1–4].

Удобной средой моделирования подобных систем являются клеточные автоматы. В работах [5–7] приведены алгоритмы оптимизации, основанные на соответствующем математическом аппарате.

Помимо [5–7], известно достаточно много исследований, в которых математический аппарат клеточных автоматов применяется для построения алгоритмов оптимизации. Отметим несколько работ в качестве примера.

В исследовании [8] клеточный автомат используется для улучшения генетического алгоритма. Для этого хромосомы генетического алгоритма записываются в ячейки двумерного клеточного автомата, и при скрещивании каждая хромосома берет генетический материал у соседей из окрестности Мура.

В работах [9, 10] клеточные автоматы объединяются с алгоритмами оптимизации, относящимися к роевому интеллекту. Статья [9] описывает модифицированный алгоритм муравьиной колонии, в

котором многомерное пространство поиска рассматривается как клеточная структура. В [10] клеточно-автоматный подход применен для улучшения алгоритма роящихся частиц. Для этого авторы работы вводят понятие окрестности частицы, под которой понимается множество частиц роя, наиболее близких к данной.

В исследовании [11] представлен клеточно-автоматный подход к улучшению мембранного алгоритма, схожий с подходом, использованным в [8] применительно к генетическому алгоритму.

Однако во всех данных работах клеточные автоматы применяются лишь в качестве вспомогательной вычислительной модели, служащей для повышения эффективности базовой метаэвристики.

В свою очередь, отличительной особенностью алгоритма, представленного в [5, 6], является использование динамики клеточного автомата для непосредственного поиска оптимума в пространстве решений. Для этого вводится и исследуется модификация классической модели клеточного автомата, названная клеточным автоматом с целевой функцией. Динамикой данной модели управляет композиция локальных правил перехода (правил развития клеточного автомата).

В [5] используется постоянная композиция правил развития, выбранная из нескольких вариантов как обеспечивающая наибольшую скорость сходимости процесса оптимизации. Результаты исследования по выбору композиции правил развития клеточного автомата с целевой функцией представлены в [6].

В [7] предлагается использовать адаптивный выбор правила развития клеточного автомата с целевой функцией. Для этого на основании текущего оптимального значения целевой функции и значений, достигнутых на двух предыдущих шагах, выбирается одно из двух правил развития клеточного автомата. Данный подход носит отчасти эмпирический характер, но в некоторых случаях позволяет избежать «застывания» в локальных оптимумах и

улучшить показатели сходимости. Однако, несмотря на это, получаемая таким образом композиция правил развития клеточного автомата не является оптимальной.

Целью настоящего исследования является создание улучшенного алгоритма оптимизации на основе клеточных автоматов с оптимальной композицией правил развития. Для получения оптимальной композиции правил развития клеточного автомата в процессе его развития предлагается использовать вычислительную модель обучаемых автоматов.

**Вычислительная модель клеточных автоматов**

Классическую математическую модель клеточного автомата можно описать совокупностью компонентов  $\langle Z^n, A, Y, \sigma \rangle$ , где  $Z^n$  – это пространство целочисленных координат клеток решетки;  $A$  – целочисленный алфавит внутренних состояний, определяющий конечное множество возможных значений отдельно взятой клетки;  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$ ,  $y_i \in Z^n, i = \overline{1, k}$  – шаблон соседства, определяющий вид окрестности, одинаковый для каждой клетки решетки;  $\sigma: A^k \rightarrow A$  – локальная функция перехода (правило развития), задаваемая аналитически или в виде множества параллельных подстановок и одновременно применяемая ко всем клеткам решетки в ходе развития клеточного автомата.

Под окрестностью клетки понимается совокупность тех клеток решетки, текущие состояния которых повлияют на состояние данной клетки в следующий момент времени. Клетка, относительно которой строится окрестность, называется центральной клеткой. Каждый из элементов шаблона соседства представляет собой вектор относительных индексов, задающих расположение одной из клеток окрестности относительно центральной клетки, т.е.  $y_i^j \in \{-r, \dots, 0, \dots, r\}$ ,  $i = \overline{1, k}, j = \overline{1, n}$ , где  $r$  – целое число [5, 12].

**Клеточный автомат с целевой функцией**

Модель клеточного автомата с целевой функцией расширяет классическую модель клеточного автомата и описывается совокупностью компонентов  $\langle Z^n, L, A, Y, \sigma, U, \Phi \rangle$ . Данное расширение классической модели является специфичным для задачи непрерывной оптимизации, его динамика направлена на достижение глобального оптимума заданной целевой функции. В представленной математической модели  $Z^n, L$  и  $Y$  соответствуют аналогичным компонентам классической модели; алфавит внутренних состояний  $A$  модифицирован и имеет вид  $A = \mathfrak{R}^m \times D$ , где  $D$  – набор меток, записываемый как некоторый отрезок ряда неотрицательных целых чисел;  $\sigma: (\mathfrak{R}^m \times D)^k \rightarrow \mathfrak{R}^m$  – локальная функция перехода, которая может быть задана лишь аналитически вследствие перехода от целочисленных значений к вещественным;  $U: \mathfrak{R}^m \rightarrow D$  – правило разметки клеток;  $\Phi = \Phi(x_1, \dots, x_m)$  – целевая функция.

Каждая клетка решетки такого клеточного автомата содержит вектор вещественных значений  $x \in \mathfrak{R}^m$ , рассматриваемый как элемент области определения целевой функции  $\Phi$ , и целочисленную метку, определяющую качество содержащегося в векторе  $x$  решения в смысле близости к лучшему решению, полученному на данном шаге развития клеточного автомата.

**Вычислительная модель обучаемых автоматов**

Вычислительная модель обучаемых автоматов основана на парадигме автомата, работающего в неизвестной среде. В каждый момент дискретного времени обучаемый автомат совершает одно из множества заранее заданных действий. Выбор действия осуществляется в соответствии с изменяющимся во времени распределением вероятностей. Среда, в которой работает автомат, отвечает реакцией на каждое выбранное им действие. Автомат изменяет вероятности выбора действий в зависимости от того, какой была реакция среды на выбранное действие: положительной или отрицательной.

Обучаемый автомат описывается тройкой  $\langle A, B, T \rangle$ , где  $A$  – это множество действий автомата,  $B$  – множество входных значений, определяющих реакцию среды на действие автомата, и  $T$  – алгоритм обучения. Множеству действий  $A$  ставится в соответствие вектор вероятностей  $P$ , определяющий вероятности выбора отдельных действий. Алгоритм обучения обновляет вектор вероятностей в каждый момент времени в зависимости от реакции среды на действия автомата [13].

Известны различные приложения обучаемых автоматов, в том числе к задаче непрерывной оптимизации [14, 15].

В настоящем исследовании данная вычислительная модель использована для выбора правил развития клеточного автомата с целевой функцией в ходе процесса оптимизации.

**Алгоритм непрерывной оптимизации на основе гибридной модели клеточных автоматов и обучаемых автоматов**

В [5] введено два правила развития клеточного автомата с целевой функцией  $\sigma_I$  и  $\sigma_{II}$ , а также правило разметки клеток  $U$ . Правило развития  $\sigma_I$  определяет новое состояние каждой клетки автомата посредством усреднения состояний «хороших» клеток окрестности, а правило развития  $\sigma_{II}$  изменяет элементы вектора, содержащегося в клетке, на некоторую величину, рассчитываемую на основе значений соответствующих элементов соседних клеток.

Обучаемый автомат, предназначенный для выбора правила развития на каждом шаге клеточного автомата, построен следующим образом.

Множество действий  $A$  содержит два элемента по числу имеющихся правил развития клеточного автомата:  $A = \{a_1, a_2\}$ , где  $a_1$  = “выполнить правило  $\sigma_I$ ”,  $a_2$  = “выполнить правило  $\sigma_{II}$ ”.

Реакция среды на действие обучаемого автомата также может принимать два значения:  $B = \{0, 1\}$ , где 0

соответствует положительной реакции, а 1 – отрицательной.

Алгоритм обучения представляет собой правило обновления вектора вероятностей  $\mathbf{P}$  после реакции среды на действие обучаемого автомата.

Если из множества  $A$  в момент времени  $t$  выбрано действие  $a_i$ , то вектор вероятностей  $\mathbf{P}$  в момент времени  $t+1$  обновляется следующим образом:

$$p_j(t+1) = \begin{cases} p_j(t) + a \cdot (1 - p_j(t)), & \text{if } i = j, \\ p_j(t) - a \cdot p_j(t), & \text{if } i \neq j, \end{cases} \quad (1)$$

если реакция среды на действие автомата положительна ( $\beta=0$ ),

$$p_j(t+1) = \begin{cases} p_j(t) \cdot (1 - b), & \text{if } i = j, \\ \frac{b}{k-1} + p_j(t)(1 - b), & \text{if } i \neq j, \end{cases} \quad (2)$$

если реакция среды на действие автомата отрицательна ( $\beta=1$ ).

Здесь  $a$  и  $b$  – это параметры алгоритма обучения, причем  $0 < b \ll a < 1$ .

Сформулируем улучшенный алгоритм оптимизации на основе клеточного автомата с целевой функцией и обучаемого автомата. Для определенности в качестве задачи оптимизации возьмем минимизацию целевой функции.

**Вход:** параметры клеточного автомата с целевой функцией; начальный вектор вероятностей выбора действий обучаемого автомата  $\mathbf{P} = [p_1 \ p_2]$ ; параметры алгоритма обучения  $a, b, \tau$ ; границы пространства поиска  $[a, b]^m \subset \mathcal{X}^m$ ; число шагов развития клеточного автомата  $T$ .

**Выход:** вектор  $\mathbf{x} \in [a, b]^m$ , являющийся точкой искомого оптимума.

**Шаг 1.** Заполнить случайными значениями из области  $[a, b]^m$  состояния всех клеток решетки клеточного автомата.

**Шаг 2.** Для каждой клетки решетки вычислить значение целевой функции, записывая получаемые значения в матрицу  $\mathbf{M} = (m_{ij})_{i=1, j=1}^{l_1, l_2}$ .

**Шаг 3.** Найти в матрице  $\mathbf{M}$  элемент с минимальным значением. Записать данное значение в  $\Phi_{\min}$ , а координаты элемента – в  $(p, q)$ .

**Шаг 4.** Найти в матрице  $\mathbf{M}$  элемент с максимальным значением. Записать данное значение в  $\Phi_{\max}$ .

**Шаг 5.** Вычислить метку каждой клетки решетки.

**Шаг 6.** Для  $t$  от 1 до  $T$  выполнить следующее:

**Шаг 6.1.** Выбрать действие обучаемого автомата в соответствии с вектором вероятностей  $\mathbf{P}$ .

**Шаг 6.2.** Выполнить выбранное действие обучаемого автомата – обновить состояние каждой клетки решетки клеточного автомата в соответствии

с выбранным правилом развития и шаблоном соседства  $\mathbf{Y}$ .

**Шаг 6.3.** Обновить матрицу  $\mathbf{M}$  и значения  $\Phi_{\min}$ ,  $\Phi_{\max}$  и  $(p, q)$ .

**Шаг 6.4.** Обновить метку каждой клетки решетки.

**Шаг 6.5.** Если  $t = 1$ , присвоить  $\beta = 0$  и перейти к шагу 6.8. В противном случае перейти к следующему шагу.

**Шаг 6.6.** Если  $\Phi_{\min}^t = \Phi_{\min}^{t-1}$ , то присвоить  $\beta = 1$  и перейти к шагу 6.8. В противном случае перейти к следующему шагу.

**Шаг 6.7.** Если  $\frac{\Phi_{\min}^{t-2} - \Phi_{\min}^{t-1}}{\Phi_{\min}^{t-1} - \Phi_{\min}^t} < \tau$ , присвоить  $\beta = 0$ . В противном случае присвоить  $\beta = 1$ .

**Шаг 6.8.** Если  $\beta = 0$ , обновить вектор вероятностей  $\mathbf{P}$  по формуле (1), в противном случае – по формуле (2).

**Шаг 7.** Вернуть состояние клетки с координатами  $(p, q)$  в качестве вектора  $\mathbf{x}$  и завершить алгоритм.

На первом шаге развития клеточного автомата с целевой функцией реакция среды на выбранное действие обучаемого автомата по умолчанию принимается положительной. На всех последующих шагах реакция среды определяется в зависимости от изменения скорости сходимости.

#### Вычислительные эксперименты

В таблице приведены результаты сравнения представленного алгоритма с исходным алгоритмом [5] на стандартных тестовых функциях многих переменных. В обоих случаях был использован клеточный автомат с решеткой  $10 \times 10$  клеток и окрестностью Мура  $3 \times 3$  клетки. Параметры обучаемого автомата в новом алгоритме были заданы следующим образом: начальное состояние вектора вероятностей  $\mathbf{P} = [0,5 \ 0,5]$ , параметры алгоритма обучения  $a = 0,9$ ,  $b = 0,1$ ,  $\tau = 0,5$ . Параметры клеточного автомата с целевой функцией  $\mu$  и  $\omega$  варьировались для разных функций.

Каждый из алгоритмов был запущен 30 раз на каждой из тестовых функций. В таблице приведены усредненные значения найденных оптимумов, а также лучшие значения.

Из данной таблицы можно увидеть, что новый алгоритм с адаптивным выбором правила развития клеточного автомата опережает исходный алгоритм [5] в большинстве случаев либо показывает одинаковый результат, проигрывая только для одной целевой функции.

Кроме того, преимуществом нового алгоритма является большая стабильность работы, что выражается в меньшем разбросе выходных значений. Разница между средними значениями получаемых решений и лучшими решениями в серии запусков меньше, чем у алгоритма [5].

**Результаты вычислительных экспериментов**

Целевая функция	Значение $\mu$	Значение $\omega$	Исходный алгоритм [5]		Новый алгоритм	
			Среднее	Лучшее	Среднее	Лучшее
$\Phi_1$	0,20	1,00	-12558,8132	<b>-12569,4866</b>	<b>-12569,4866</b>	<b>-12569,4866</b>
$\Phi_2$	0,15	0,75	$9,0933 \cdot 10^{-2}$	<b>0</b>	<b><math>3,4249 \cdot 10^{-6}</math></b>	<b>0</b>
$\Phi_3$	0,50	0,70	$5,2374 \cdot 10^{-4}$	<b>0</b>	<b><math>3,8203 \cdot 10^{-5}</math></b>	<b>0</b>
$\Phi_4$	0,40	0,55	<b><math>9,7298 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b>0</b>	$2,0775 \cdot 10^{-3}$	<b>0</b>
$\Phi_5$	0,10	0,95	-99,4094	-99,5339	<b>-99,5540</b>	<b>-99,6012</b>
$\Phi_6$	0,10	1,00	-78,3315	<b>-78,3323</b>	<b>-78,3323</b>	<b>-78,3323</b>
$\Phi_7$	0,90	0,95	<b>16,7522</b>	2,3542	29,0445	<b>1,8310</b>
$\Phi_8$	0,30	0,80	$3,2277 \cdot 10^{-7}$	<b>0</b>	<b><math>1,5271 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b>0</b>
$\Phi_9$	0,30	0,80	$6,4751 \cdot 10^{-5}$	<b>0</b>	<b><math>9,8860 \cdot 10^{-6}</math></b>	<b>0</b>
$\Phi_{10}$	0,50	0,10	<b>0,1041</b>	<b>0,0256</b>	0,2553	0,0482

**Заключение**

В данной статье представлен новый алгоритм непрерывной оптимизации функций многих переменных, основанный на объединении вычислительных моделей клеточных автоматов и обучаемых автоматов и представляющий собой улучшение ранее полученного алгоритма, опубликованного в статье [5].

Отличительной особенностью нового алгоритма является использование обучаемого автомата для выбора правил развития клеточного автомата с целевой функцией в ходе процесса оптимизации. Результаты вычислительных экспериментов, проведенных со стандартными тестовыми функциями, показали, что данное решение позволило повысить эффективность процесса оптимизации в части точности получаемых решений.

*Литература*

- Kennedy J. Particle Swarm Optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. – Perth: IEEE, 1995. – P. 1942–1948.
- Dorigo M. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents / M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colomni // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). – 1996. – Vol. 26, No. 1. – P. 29–41.
- Storn R. Differential Evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces / R. Storn, K. Price // Journal of Global Optimization. – 1997. – Vol. 11, No. 44. – P. 341–359.
- Karaboga D. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence / D. Karaboga, B. Akay // Artificial Intelligence Review. – 2009. – Vol. 31, No. 1–3. – P. 61–85.
- The Algorithm of Continuous Optimization Based on the Modified Cellular Automaton / O. Evsutin, A. Shelupanov, R. Meshcheryakov, D. Bondarenko, A. Rashchupkina // Symmetry. – 2016. – Vol. 8, No. 9. – Article number 84.
- Евсютин О.О. Клеточный автомат с целевой функцией // Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики: тр. междунар. конф., посвященной 90-летию со дня рождения акад. Г.И. Марчука. – Новосибирск: Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 2015. – С. 230–235.
- Бондаренко Д.О. Непрерывная оптимизация с помощью клеточного автомата с адаптивным выбором правила развития / Д.О. Бондаренко, О.О. Евсютин, А.В. Ращупкина // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 4(38). – С. 119–122.

- Canyurt O.E. Cellular genetic algorithm technique for the multicriterion design optimization / O.E. Canyurt; P. Hajela // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2010. – Vol. 40, No. 1–6. – P. 201–214.
- Du T.S. A new cellular automata-based mixed cellular ant algorithm for solving continuous system optimization programs / T.S. Du, P.S. Fei, Y.J. Shen // Proceedings of the 4-th International Conference on Natural Computation. – Jinan: IEEE, 2008. – P. 407–411.
- Gholizadeh S. Layout optimization of truss structures by hybridizing cellular automata and particle swarm optimization // Computers and Structures. – 2013. – Vol. 125. – P. 86–99.
- Han M. An evolutionary membrane algorithm for global numerical optimization problems / M. Han, C. Liua, J. Xing // Information Sciences. – 2014. – Vol. 276. – P. 219–241.
- Кудрявцев В.Б. Основы теории однородных структур / В.Б. Кудрявцев, А.С. Подколзин, А.А. Болотов. – М.: Наука, 1990. – 296 с.
- Beigy H. A mathematical framework for cellular learning automata / H. Beigy, M.R. Meybodi // Advances in Complex Systems. – 2004. – Vol. 7, No. 3–4. – P. 295–319.
- Santharam G. Continuous Action Set Learning Automata for Stochastic Optimization / G. Santharam, P.S. Sastry, M.A.L. Thathachar // Journal of the Franklin Institute. – 1994. – Vol. 331, No. 5. – P. 607–628.
- Hashemi A.B. A Note on the Learning Automata Based Algorithms for Adaptive Parameter Selection in PSO / A.B. Hashemi, M.R. Meybodi // Applied Soft Computing Journal. – 2011. – Vol. 11, No. 1. – P. 689–705.

**Евсютин Олег Олегович**

Канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр.  
каф. безопасности информационных систем (БИС)  
Томского государственного ун-та систем управления  
и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Красноармейская ул., 146, г. Томск, Россия, 634045  
ORCID 0000-0002-8257-2082  
Тел.: +7-923-403-09-21  
Эл. почта: eoo@keva.tusur.ru

**Шелупанов Александр Александрович**

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

**Бабишин Владимир Денисович**

Д-р техн. наук, ст. науч. сотр., преподаватель аспирантуры  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»  
Вольная ул., 30, г. Москва, Россия, 105187  
Тел.: +7-926-311-85-38  
Эл. почта: Vova.babishin@yandex.ru

**Соседко Ксения Андреевна**

Методист аспирантуры АО «Корпорация «ВНИИЭМ»  
Вольная ул., 30, г. Москва, Россия, 105187  
Тел.: +7-915-021-27-84  
Эл. почта: ksenya-1991@bk.ru

Evsutin O.O., Shelupanov A.A., Babishin V.D., Sosedko K.A.  
**Continuous optimization using a hybrid model of cellular automata and learning automata**

The article presents an algorithm for continuous optimization of several variables functions, based on a computational model of cellular automata with an objective function. An effectiveness of this computational model depends on choice of the cellular automata development rule. At the same time, the use of rule compositions shows greater efficiency compared with the use of individual rules. A distinctive feature of this study is the use of a dynamic composition, formed during the development of cellular automata with an objective function. The rule choice at each step of the cellular automata development is carried out by a learning automata computational model. The results of computational experiments conducted with standard test functions show that this solution can improve the accuracy of optimization.

**Keywords:** continuous optimization, cellular automata, learning automata, cellular automaton with an objective function.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-50-54

*References*

1. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. Proc. of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, IEEE, 1995. pp. 1942–1948.
2. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 1996, vol. 26, no. 1, pp. 29–41.
3. Storn R., Price K. Differential Evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 1997, vol. 11, no. 4 pp. 341–359.
4. Karaboga D., Akay B. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence. *Artificial Intelligence Review*, 2009, vol. 31, no. 1–4, pp. 61–85.
5. Evsutin O., Shelupanov A., Meshcheryakov R., Bondarenko D., Raschupkina A. The Algorithm of Continuous Optimization Based on the Modified Cellular Automaton. *Symmetry*, 2016, vol. 8, no. 9, article number 84.
6. Evsutin O.O. Kletochnyj avtomat s celevoj funkciej [Cellular automaton with an objective function]. Aktual'nye problemy vychislitel'noj i prikladnoj ma-tematiki: Trudy Mezhdunarodnoj konferencii, posvjashhen-noj 90-letiju so dnja rozhdenija akademika G.I. Marchuka [Advanced Mathematics, Computations and Applications 2015. Proc. of the international conference]. Novosibirsk, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 2015, pp. 230–235 (in Russ.).

7. Bondarenko D.O., Evsutin O.O., Raschupkina A.V. Continuous optimization using cellular automata by choosing the evolution rule. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, no. 4(38), pp. 119–122 (in Russ.).

8. Canyurt O.E., Hajela P. Cellular genetic algorithm technique for the multicriterion design optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, vol. 40, no. 1–6, pp. 201–214.

9. Du T.S., Fei P.S., Shen Y.J. A new cellular automata-based mixed cellular ant algorithm for solving continuous system optimization programs. Proc. of the 4-th International Conference on Natural Computation. Jinan, IEEE, 2008, pp. 407–411.

10. Gholizadeh S. Layout optimization of truss structures by hybridizing cellular automata and particle swarm optimization. *Computers and Structures*, 2013, vol. 125, pp. 86–99.

11. Han M., Liua C., Xing J. An evolutionary membrane algorithm for global numerical optimization problems. *Information Sciences*, 2014, vol. 276, pp. 219–241.

12. Kudryavcev V.B., Podkolzin A.S., Bolotov A.A. Osnovy teorii odnorodnyh struktur [The foundations of the theory of homogeneous structures]. Moscow, Nauka, 1990, 296 p. (in Russ.).

13. Beigy H., Meybodi M.R. A mathematical framework for cellular learning automata. *Advances in Complex Systems*, 2004, vol. 7, no. 3–4, pp. 295–319.

14. Santharam G., Sastry P.S., Thathachar M.A.L. Continuous Action Set Learning Automata for Stochastic Optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 1994, vol. 331, no. 5, pp. 607–628.

15. Hashemi A.B., Meybodi M.R. A Note on the Learning Automata Based Algorithms for Adaptive Parameter Selection in PSO. *Applied Soft Computing Journal*, 2011 vol. 11, no. 1, pp. 689–705.

**Oleg O. Evsutin**

Candidate of Engineering, Senior Researcher,  
Department of Information Systems Security, Tomsk State  
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
146, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634045  
ORCID 0000-0002-8257-2082  
Phone: +7-923-403-09-21  
Email: eoo@keva.tusur.ru

**Alexander A. Shelupanov**

Doctor of Engineering, Professor, Rector TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 51-05-30  
Email: saa@tusur.ru

**Vladimir D. Babishin**

Doctor of Engineering, Senior Researcher, Professor  
Graduate School JC «VNIEM Corporation»  
30, Volnaia st., Moscow, Russia, 105187  
Phone: +7-926-311-85-38  
Email: Vova.babishin@yandex.ru

**Ksenia A. Sosedko**

Supervisor, Graduate School JC «VNIEM Corporation»  
30, Volnaia st., Moscow, Russia, 105187  
Phone: +7-915-021-27-84  
Email: ksenya-1991@bk.ru

УДК 004.057.4

Е.В. Щерба, Г.А. Литвинов, М.В. Щерба

## Задача обеспечения качества обслуживания на базе протокола маршрутизации OLSR: подходы, алгоритмы, решения

Представлен обзор и выполнен анализ научных работ, направленных на решение задачи обеспечения качества обслуживания в рамках графо-комбинаторного подхода на базе протокола маршрутизации OLSR. Несмотря на значительное количество решений, базирующихся на единственном показателе, особый практический интерес представляют расширения протокола, учитывающие сразу несколько показателей качества маршрутов. Систематизированы существующие постановки задачи с обеспечением качества обслуживания по множеству показателей и проанализированы основные алгоритмические подходы к их решению. На основании проведенного исследования предложены перспективные направления для решения рассматриваемой задачи в новой, обобщенной, постановке.

**Ключевые слова:** многокритериальная маршрутизация, маршрутизация с ограничениями, самоорганизующиеся сети.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-55-65

Полносвязные, мобильные, сенсорные и другие типы динамически организуемых сетей с децентрализованной архитектурой регулярно находят применение в различных сферах гражданской и военной деятельности – технологии «умного дома», сети медицинского назначения, сети транспортной инфраструктуры, сети беспилотных летательных аппаратов и др. При этом распространение данных технологий зависит от эффективности решения некоторых ключевых задач. В частности, решение задачи обеспечения качества обслуживания (Quality of Service, QoS) в динамически организуемых сетях не может быть выполнено на основе моделей и алгоритмов, применяемых в сетях с традиционной архитектурой. Ресурсы узлов и характеристики каналов связи в динамически организуемых сетях, как правило, существенно ограничены, что принципиально усложняет решаемую задачу [1]. В то же время обеспечение QoS является обязательным условием для возможности использования значительного количества сетевых приложений, включая, например, мобильные системы телехирургии и различные службы потоковых видеотрансляций.

Протокол QoS-маршрутизации играет важную роль в схеме обеспечения QoS, поскольку именно он определяет оптимальный маршрут и передающие узлы, отвечающие предъявляемым требованиям. Поддержка качества обслуживания в рамках конкретного протокола производится по одному или одновременно по множеству разнотипных показателей (временных, скоростных и пр.). К традиционным показателям маршрутов и каналов связи можно отнести пропускную способность, задержку, джиттер, вероятность потери пакетов и стоимость передачи. Специфика динамически организуемых сетей определяет ряд новых показателей, включая мобильность, уровень безопасности, уровень остаточной энергии и энергии, затрачиваемой на передачу пакета.

Все маршрутные метрики, построенные на указанных показателях, можно отнести к одной из трех

групп: аддитивные, мультипликативные и вогнутые. Значение аддитивной метрики маршрута (например, возникающая задержка и стоимость) вычисляется посредством сложения значений данной метрики для всех каналов связи, составляющих маршрут. Значение мультипликативной метрики маршрута (например, вероятность потери пакетов) вычисляется как произведение значений данной метрики для всех каналов связи, составляющих маршрут. При этом можно использовать процедуру логарифмирования для преобразования мультипликативных метрик к аддитивным метрикам. Значение вогнутой метрики маршрута (например, уровень безопасности и пропускная способность) задается как наименьшее значение среди значений данной метрики для всех каналов связи, составляющих маршрут.

Протокол маршрутизации OLSR, получивший широкое распространение в динамически организуемых сетях с высокой плотностью и низкой мобильностью узлов, согласно спецификациям не предусматривает механизмов поддержки качества обслуживания [2]. В рамках протокола каждый узел осуществляет среди соседних узлов оптимальный выбор подмножества шлюзов MPR (Multipoint Relay), обеспечивающих возможность взаимодействия со всеми узлами в пределах двух переходов. Каждый MPR-шлюз выполняет широковещательную рассылку сообщений TC (Topology Control), в которых содержатся объявления маршрутов ко всем узлам-селекторам, выбравшим данный узел в качестве шлюза MPR. Все MPR-шлюзы выполняют пересылку сообщений TC своим узлам-селекторам. Каждый узел заполняет базу данных сетевой топологии на основе полученных сообщений HELLO и TC, которую в дальнейшем использует для поиска оптимальных маршрутов до всех получателей по установленной маршрутной метрике.

Архитектура и достоинства базового протокола OLSR способствовали разработке множества различных модификаций этого протокола, обеспечивающих поддержку QoS в том или ином виде. Мно-



гие из предложенных решений обеспечивают поддержку качества обслуживания на базе OLSR только по единственному показателю, в рамках некоторых других работ учитывается сразу несколько показателей качества маршрутов. При этом в существующих исследованиях могут рассматриваться различные постановки проблемы и применяемые алгоритмы для её решения.

Таким образом, основная цель настоящей работы заключается в исследовании и анализе существующих решений задачи обеспечения QoS на базе протокола маршрутизации OLSR в целях определения перспективных подходов и алгоритмов для решения указанной задачи в новой, обобщенной, постановке.

### **Расширения протокола OLSR с обеспечением QoS по одному показателю**

В настоящем разделе статьи проанализированы модификации и расширения протокола маршрутизации OLSR, обеспечивающие поддержку QoS только по одному показателю.

В рамках протокола OLSR энергосберегающие решения либо предлагают минимизировать энергопотребление узлов, либо обеспечить максимальный срок возможности сетевого взаимодействия. Первая категория решений связана с модификацией алгоритма выбора шлюзов MPR, используемого в рамках OLSR. Цель данной модификации состоит в том, чтобы в качестве шлюзов MPR выбирать узлы с высоким уровнем остаточной энергии.

В работе [3] авторы предложили два механизма выбора MPR под названием E-OLSR1 и E-OLSR2. Они используют уровень остаточной энергии соседних узлов и энергетическую стоимость отправки пакетов в качестве показателя для выбора MPR.

EE-OLSR представляет расширение OLSR с модификацией механизма выбора шлюзов MPR [4]. В рамках EE-OLSR предлагается интегрировать стоимость энергии в параметр готовности узла, определенный в RFC3626, чтобы выразить способность узлов стать шлюзом MPR. Оценка потребления энергии и уровня остаточной энергии на каждом узле выполняется локально до ее передачи в остальную сеть посредством распространения значения готовности. Два преимущества этого подхода: использование времени жизни узла, которое дает более точное представление о статусе узла, и распространение информации с помощью параметра готовности, что не требует генерации дополнительного трафика.

Проблема, характерная для всех подобных расширений, заключается в том, что они не учитывают максимальную степень узлов, выбранных шлюзами MPR. Фактически как только узел проявляет высокую остаточную энергию, согласно модифицированному алгоритму MPR, узел будет добавлен в список MPR, что впоследствии может привести к значительному объему широкополосного трафика.

Ещё одна проблема, связанная с указанными расширениями, заключается в том, что они не учитывают количество передаваемых узлом данных, что

может привести к быстрому энергетическому истощению даже при высоком уровне остаточной энергии в момент выбора шлюзов MPR. В работе [5] авторы предложили объединить мобильность и уровень остаточной энергии в параметре готовности. В качестве MPR алгоритм выбирает стабильные узлы с большим оставшимся временем жизни. Сочетание двух указанных показателей позволяет несколько повысить эффективность по сравнению с другими подходами, использующими единственную энергетическую метрику.

Вторая категория решений позволяет учитывать метрику энергии в процессе выбора маршрута доставки пакетов. В рамках OLSRE авторы предложили улучшенную версию энергоэффективной маршрутизации на основе OLSR [6]. В OLSRE потребление энергии учитывается во время маршрутизации пакетов и вычисляется стоимость передачи пакетов по маршруту до получателя. Однако этот протокол имеет высокие накладные расходы и не учитывает уровень остаточной энергии узлов.

OLSR\_EA измеряет и прогнозирует потребление энергии на каждый временной интервал на основе модели авторегрессионного скользящего среднего для прогнозирования временных рядов [7]. Авторы разработали композитную энергетическую метрику стоимости, которая учитывает потребление энергии в процессе передачи пакетов и остаточную энергию каждого узла, и используют данную метрику в качестве основной при выборе маршрутов. Но при этом OLSR\_EA характеризуется более высокой вероятностью коллизий сигнала, если узел ретрансляции обладает большим радиусом распространения сигнала по сравнению с соседними узлами, поэтому он не является предпочтительным в больших сетях.

В рамках OLSRM авторы предложили новый протокол [8], основанный на исходном стандарте OLSR. Они использовали многопутевую версию протокола OLSR и концепцию маршрутизации источника для выбора маршрута. Протокол должен быть энергоэффективным за счёт выбора маршрутов через соседние узлы на основе уровня остаточной энергии узлов и скорости её потребления. Предлагаемый алгоритм радикально изменяет исходный OLSR, при этом основной недостаток заключается в высоком времени ожидания установления маршрута.

Пропускная способность является критическим показателем производительности сети. Оценка пропускной способности сети в заданный момент времени и в определенной части сети сложна, так как среда совместно используется множеством узлов в беспроводной сети. Доступная пропускная способность между двумя соседними узлами определяется как максимальный объем полезных данных, который может быть передан в единицу времени между этими двумя одноранговыми узлами без нарушения существующих сетевых потоков данных. Как и энергетическая метрика, пропускная способность является вогнутой метрикой. Для заданного маршрута пропускная способность определяется как

минимальное значение пропускной способности для всех каналов связи, образующих маршрут от узла источника до узла назначения.

Схемы OLSR\_R1, OLSR\_R2 и OLSR\_R3 представляют три пересмотренных алгоритма выбора MPR с использованием метрики пропускной способности [9]. Для OLSR\_R1 выбор MPR почти такой же, как и для OLSR. Однако в случае, когда имеется более одного соседа, охватывающего одно и то же количество неохваченных соседей, достижимых за 2 перехода, тот, который имеет максимальную пропускную способность до текущего узла, выбирается как MPR. В рамках OLSR\_R2 в качестве MPR отбираются соседние узлы с максимальной пропускной способностью до тех пор, пока не будут охвачены все узлы, достижимые за 2 перехода.

Что касается OLSR\_R3, то речь идет о выборе MPR таким образом, чтобы все узлы, достижимые за 2 перехода, имели маршрут через MPR к текущему узлу с максимальной пропускной способностью. В целях оптимизации объема широковещательных сообщений OLSR\_R3 является предпочтительным, поскольку обеспечивает оптимальное количество MPR. Однако OLSR\_R1 и R2 действительно оптимальны в отношении надежности канала. OLSR\_R2 имеет меньше накладных расходов, чем OLSR\_R3. Кроме того, OLSR\_R2 проще в реализации по сравнению с OLSR\_R3. Для всех расширений цель состоит в том, чтобы ввести пропускную способность в качестве основной метрики при выборе маршрута.

Предложенная модификация затрагивает проблему асимметричных связей в беспроводных сетях, поскольку узлы, изначально выбранные как шлюзы MPR, в дальнейшем используются для формирования маршрутов, используемых в процессе маршрутизации. Большинство подходов, использующих пропускную способность в качестве основного критерия для QoS, пренебрегают влиянием помех, что не всегда верно. Получаемые результаты могут сильно зависеть от процедуры оценки пропускной способности канала (пассивной, активной или аналитической).

Чтобы разрешить проблему помех при оценке пропускной способности, в [10] предлагаются формула интерференции и новый протокол маршрутизации по множеству непересекающихся путей LIA-MPOLSR. Наибольшее отличие LIA-MPOLSR от других протоколов многопутевой маршрутизации на базе OLSR заключается в том, что LIA-MPOLSR вычисляет интерференцию, принимая во внимание географическое расстояние между узлами, а не число переходов.

С появлением приложений реального времени в беспроводных сетях все чаще требуется гарантированный уровень максимальной задержки. Чтобы обеспечить поддержку чувствительного к задержкам трафика в таких сетях, точная оценка задержки является необходимым шагом. Задержка указывает время отправки пакета от источника к целевому узлу. Задержка является аддитивной метрикой. Таким

образом, задержка для маршрута равна сумме задержек в каналах связи, образующих этот маршрут.

Ограничение задержки в OLSR представлено и смоделировано в [11], авторы аналитически изучают различные методы оценки задержки в беспроводных каналах. Они указывают на проблему синхронизации между отправителем и получателем в архитектуре самоорганизующихся сетей, особенно при использовании широковещательного пакета для оценки среднего времени передачи. В OLSR управляющие пакеты передаются с джиттером во избежание возможных столкновений из-за проблемы синхронизации. Этот джиттер необходимо учитывать при использовании этих пакетов для оценки средней задержки передачи в канале связи.

Авторы [12] предлагают OLSR\_ETX, специальное расширение OLSR, которое использует новый аддитивный показатель качества – ожидаемое число отправленных пакетов (Expected Transmission Count, ETX) для корректной передачи заданного числа пакетов. Каждый узел независимо измеряет ETX для локальных каналов. Выбор маршрута производится таким образом, чтобы совокупное значение показателя было минимизировано. В развитие указанного подхода был предложен ещё один сложный показатель качества – ожидаемое время передачи (Estimated Transmission Time, ETT), значение которого зависит от пропускной способности каналов и возникающих задержек одновременно.

В рамках расширения OLSR\_NN авторы используют нейронную сеть для прогнозирования задержек [13]. Чтобы обеспечить использование прогнозируемых задержек при расчете таблицы маршрутизации, авторы разработали алгоритм, называемый TierUp, который представляет собой модификацию алгоритма Дейкстры [14]. Чтобы упростить оценку задержки, они рассматривают простейшую модель очереди, предполагая, что все узлы имеют общий всенаправленный радиоканал с фиксированной номинальной пропускной способностью и каждый узел использует простую очередь FIFO для всех исходящих пакетов, что не является точным в реальной беспроводной передаче. На самом деле управляющие пакеты имеют приоритет над пакетами данных, что может снизить показатели OLSR\_NN в практической реализации.

В этом же контексте можно сослаться на расширение OLSR-MD [15], который предполагает измерение задержек связи между узлами. Расчёт задержек производится через самоорганизующуюся сеть. Поэтому все вычисления таблиц маршрутизации основаны на информации от соседних узлов. OLSR-MD производит выбор таких маршрутов между текущим узлом и другими узлами в сети, которые имеют минимальную сумму различных задержек передачи для всех составляющих каналов связи.

Поддержка мобильности остается одной из самых сложных проблем в архитектуре самоорганизующихся сетей, особенно для протоколов маршрутизации. Проактивный характер протокола маршру-

тизации OLSR делает его пригодным для плотных и менее мобильных сетей. Быстрое расширение протокола OLSR может быть основано на дифференциации поведения мобильных и стационарных узлов. Мобильный узел может переходить в подвижное состояние, где алгоритм выбора MPR легко определяется для эффективного управления перемещением узлов [16]. Механизм для прогнозирования подвижности узлов может быть построен на специальной математической модели. Её суть заключается в вычислении координат и скоростей узлов для построения глобального представления графика мобильности соседних узлов.

Авторы в [17] вводят идею использования времени жизни канала связи в качестве метрики мобильности для выбора шлюзов MPR. Такой подход достаточно прост в реализации и не требует какого-либо расширения заголовка управляющих пакетов OLSR, в чем состоит его преимущество. Однако оценка остается локальной, если узлы не обмениваются информацией о состоянии мобильности соседних узлов. Авторы изменили процесс выбора MPR, чтобы обеспечить выбор стационарных узлов.

Аналогичным образом можно изменить вспомогательный функционал протокола OLSR, чтобы осуществлять учет мобильности узлов. Задача состоит в том, чтобы обеспечить обмен между соседними узлами показателями мобильности (стабильности), которые используются в эвристическом выборе шлюзов MPR. Основным принципом такого подхода является возможность определения неустойчивости маршрута на основе статуса канала связи. Однако несовместимость подобного подхода со стандартом OLSR является препятствием перед его практическим развертыванием в реальных сетях, где различные узлы могут участвовать в единой схеме связи. Помимо этого, распространение информации QoS внутри сети связано с добавлением дополнительных полей в управляющие пакеты, при этом размер передаваемых данных будет пропорционально расти с увеличением плотности сети.

Важно отметить, что в целом единственный показатель качества обслуживания является существенным ограничением для практического применения рассмотренных выше модификаций протокола маршрутизации OLSR. Таким образом, что задача обеспечения качества обслуживания, как правило, требует рассмотрения совокупности маршрутных метрик.

#### **Подходы к обеспечению QoS с использованием множества маршрутных метрик**

В зависимости от конкретной модели обеспечения качества обслуживания на базе множества маршрутных метрик могут рассматриваться различные постановки алгоритмических задач и способы их решения.

Простейший подход, позволяющий учитывать множество показателей качества маршрутов, заключается в разработке и использовании единой комбинированной аддитивной метрики, объединяющей в себе

все возможные или некоторые из рассмотренных выше показатели качества маршрутов. Несмотря на относительную простоту указанного подхода, следует заметить, что он обеспечивает доставку с «максимальными усилиями» (best-effort delivery) и не соответствует концепциям обеспечения QoS, а предлагаемое решение может не отвечать ни единому ограничению по требуемому качеству обслуживания.

#### **Задача поиска подходящих маршрутов с множественными ограничениями**

Классическая задача поиска маршрутов, удовлетворяющих множеству требований к качеству обслуживания, формулируется следующим образом. Пусть задано множество вершин графа  $V$ , соответствующее множеству взаимодействующих узлов сети, множество дуг графа  $E$ , соответствующее множеству каналов связи, в множестве  $V$  заданы специальные вершины  $s$  и  $t$  (узел источника и узел назначения соответственно). Для каждой дуги  $e$  назначено значение аддитивной метрики стоимости  $c(e)$  и значения  $k$  специальных метрик, характеризующих канал связи. Для каждой  $i$ -й метрики  $w_i$  задана функция  $f_i$ , предназначенная для вычисления значения метрики пути на основе значений метрики для дуг, составляющих этот путь:

$$f_i(p) = f_i(w_i(e_0), w_i(e_1), \dots, w_i(e_{h-1})). \quad (1)$$

Также задан кортеж ограничений  $L = (l_1, \dots, l_k)$  по соответствующим маршрутным метрикам, отражающий требования к маршруту, который необходимо найти. Путь между узлом источника  $s$  и узлом назначения  $t$  называется подходящим (другими словами, маршрут удовлетворяет предъявляемым требованиям), только если значения всех рассматриваемых метрик данного пути не выходят за пределы соответствующих метрикам ограничений, раскрывающих требования к качеству обслуживания:

$$f_i(p) \leq l_i, \quad i=1,2,\dots,k. \quad (2)$$

Задача MCP (Multi-Constrained Path) заключается в том, чтобы для заданной пары вершин найти хотя бы один подходящий путь, а для решения задачи MCOP (Multi-Constrained Optimal Path) требуется для заданной пары вершин найти подходящий путь с наименьшей стоимостью [18]. Рассматриваемые задачи могут иметь только одно решение, могут иметь несколько различных решений, а также могут не иметь решений, если не существует маршрута, удовлетворяющего сразу всем ограничениям.

В общем случае поиск маршрута с учетом ограничений по двум или большему числу различных аддитивных метрик является NP-полной задачей. Тем не менее для решения указанных задач был предложен ряд эвристических алгоритмов, позволяющих оптимизировать поиск подходящего решения, и несколько приближенных алгоритмов, позволяющих осуществлять поиск решений, подходящих с некоторой погрешностью. Указанные алгоритмы рассмотрены в следующем разделе настоящей статьи.

В связи с тем, что в динамически организуемых сетях общее количество различных показателей ка-

чества маршрутов и соответствующих им ограничений возрастает, задачи поиска подходящих маршрутов МСР и МСОР значительно усложняются. Кроме того, если количество ограничений слишком велико, задача может не иметь решений, поскольку становится переограниченной (over-constrained). В результате в каждом случае требуется вначале выяснить, имеются ли решения задачи вообще (что представляет отдельную задачу), а затем нужно решить, какие из ограничений ослабить, чтобы задача стала разрешимой [19]. Исходя из этого, описанный подход к поиску маршрутов редко используется напрямую в протоколах маршрутизации более чем с двумя ограничениями.

В работе [20] рассматриваются два показателя качества маршрутов и предлагается расширение протокола OLSR, основанное на приближенном поиске маршрута с минимальной задержкой в условиях заданного ограничения на потери пакетов (что соответствует задаче Restricted Shortest Path, RSP).

**Задача поиска оптимального маршрута по множеству критериев**

Приемлемой на практике альтернативой поиску маршрутов с множественными ограничениями является многокритериальная маршрутизация без заданных ограничений [21]. В рамках указанной задачи требуется найти решение (маршрут), позволяющее минимизировать значения рассматриваемых целевых функций (маршрутных метрик).

Поскольку минимизировать значения всех целевых функций одновременно, как правило, невозможно, часто многокритериальные задачи решаются посредством принятия схемы компромисса между критериями, что предполагает решение вместо многокритериальной задачи одной или нескольких однокритериальных задач в результате свертки критериев. Результат решения напрямую зависит от выбранного способа свертки, поэтому его выбор имеет определяющее значение. Такой подход используется, например, в рамках протокола маршрутизации OLSR\_MO (Multi-Objective OLSR) [22]. Авторы прогнозируют значения трех показателей каналов (задержка, потребление энергии, время жизни), производят аддитивную свертку критериев и вычисляют оптимальные маршруты по полученному критерию, используя модифицированный алгоритм Дейкстры.

Аналогичный подход применяется для построения многопутевой версии протокола FQ-MP-OLSR в [23], где в качестве маршрутных метрик применяются задержка, полезная пропускная способность и уровень помех.

В работе [24] авторы использовали пропускную способность, задержку и коэффициент потерь пакетов для создания композитной маршрутной метрики, применяемой для поиска оптимальных маршрутов. В то же время выбор шлюзов MPR производится на основе показателей мобильности и относительного уровня остаточной энергии узлов.

Помимо свертки критериев, может рассматриваться поиск всех эффективных решений (опти-

мальных по Парето) [21]. Решение  $p$  является оптимальным по Парето, если не существует другого решения  $p^*$ , которое превосходит  $p$  хотя бы по одному критерию, а по остальным критериям не хуже

$$f_i(p^*) \geq f_i(p), \forall i \in [1, k],$$

$$\exists j \in [1, k] : f_j(p^*) > f_j(p).$$

В противном случае говорят, что решение  $p^*$  доминирует решение  $p$ . Как правило, существует несколько недоминируемых решений, образующих множество оптимальных по Парето решений, которые формируют Парето-фронт в области значений целевых функций. Для выбора оптимального маршрута требуется найти максимально возможное количество Парето-оптимальных решений и на основе анализа значений целевых функций выбрать одно из них, используя определенный процесс принятия решений (рис. 1).

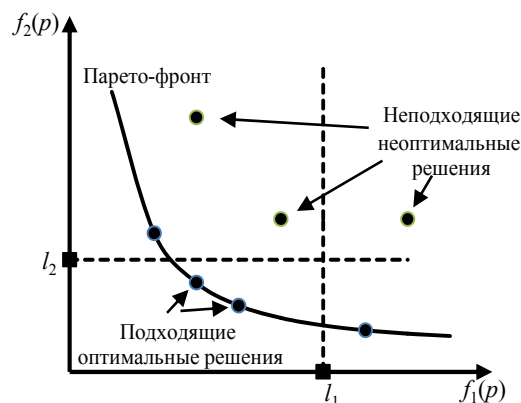


Рис. 1. Пример наличия двух подходящих недоминируемых решений в задаче с двумя маршрутными метриками

Подобный подход, реализован, например, в [25], где рассматривается три показателя качества маршрутов (ETX, задержка, потери пакетов), а для выбора оптимального маршрута среди множества альтернатив используется метод анализа иерархий.

Если маршрутные метрики можно ранжировать, исходя из их важности, в этом случае оптимизация проводится по лексикографическому порядку. Каждой маршрутной метрике назначается приоритет, который определяет порядок, в котором соответствующие функции будут оптимизированы. Благодаря иерархии среди критериев появляется возможность решать лексикографические задачи последовательно, минимизируя на каждой итерации по одному критерию и используя оптимальные значения критериев, полученные в ходе предыдущих итераций, как ограничения. Для получения набора эффективных решений процедура поиска решений может производиться многократно, используя различный лексикографический порядок.

**Задача поиска подходящих маршрутов с множественными мягкими ограничениями**

Вместе с тем следует учитывать, что полный отказ от задаваемых ограничений не всегда является возможным. Решение рассматриваемой проблемы обеспечения качества обслуживания в динамически

организуемых сетях возможно на основе протоколов «мягкой» QoS-маршрутизации, которые способны за приемлемое время предоставлять один или несколько маршрутов, «наилучшим» образом отвечающих предъявляемым требованиям, даже если маршрута, отвечающего сразу всем требованиям, не существует. Для создания таких протоколов может рассматриваться специальная обобщенная постановка проблемы поиска оптимального пути с множественными ограничениями для переограниченных случаев.

Суть предлагаемого подхода заключается в том, чтобы признать часть ограничений «мягкими» и обобщить МСР и МСОР как задачи поиска маршрутов, удовлетворяющих максимальному количеству «мягких» ограничений и всем «жестким» ограничениям одновременно [26]. Даже в тех случаях, когда решения исходной задачи МСОР по всем ограничениям не существует, в рамках решения задачи в новой обобщенной постановке можно найти «наиболее подходящее» решение. В частном случае, когда все ограничения являются «мягкими», задача именуется как МАХ-МСОР, в частном случае, когда все ограничения будут «жесткими», задача представляет классическую задачу МСОР. Поскольку сформулированная задача является обобщением задачи МСОР, она также является NP-полной.

Учитывая количество оптимизируемых показателей качества маршрутов и количество рассматриваемых ограничений, можно привести следующую классификацию алгоритмических задач, рассматриваемых в рамках обеспечения маршрутизации с поддержкой QoS (таблица).

**Различные постановки задач QoS-маршрутизации**

Задача	Количество оптимизируемых показателей	Количество ограничений
SP (Shortest Path)	1	0
RSP (Restricted Shortest Path)	1	1
MCP (Multi-Constrained Path)	0	$k$
MCOP (Multi-Constrained Optimal Path)	1	$k$
MOOP (Multi-Objective Optimal Path)	$k$	$0^*$
MAX-MCOP (Maximum Multi-Constrained Optimal Path)	1	$0 \dots k^{**}$

\* Возможно введение дополнительных ограничений по некоторым показателям.

\*\* Требуется найти решение, удовлетворяющее максимально возможному количеству ограничений.

#### Алгоритмы решения задач поиска подходящих маршрутов

Несмотря на то, что классические алгоритмы Дейкстры [14] и Беллмана–Форда [27] обеспечивают поиск оптимального решения только по одному по-

казателю, они широко используются при построении других алгоритмов решения всех вышеуказанных задач. Подробное описание возможностей применения этих алгоритмов можно найти в [21].

Один из первых алгоритмов для решения проблемы МСОР был предложен в [28]. Автор предложил использовать композитную метрику стоимости маршрута, определяемую на основе заданных показателей и ограничений:

$$f(p) = \sum_{i=1}^k \frac{f_i(p)}{l_i}. \quad (4)$$

Наличие единственной метрики позволяет применить известные алгоритмы поиска кратчайшего пути и их всевозможные расширения. Проблема заключается в том, что найденный путь с минимальным значением стоимости не всегда является решением рассматриваемой задачи, поскольку значения некоторых из его маршрутных метрик могут лежать за пределами заданных ограничений (рис. 2).

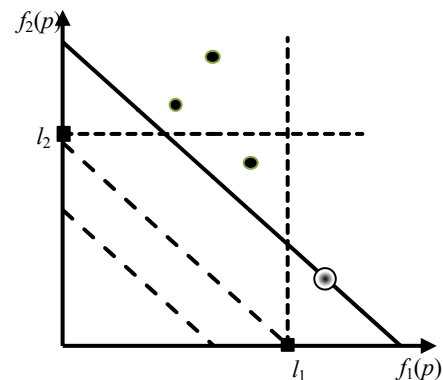


Рис. 2. Пример нахождения неподходящего пути (при наличии подходящего) в задаче с двумя ограничениями

Развитие указанного подхода было предложено в рамках точного алгоритма SAMCRA [29]. Авторы работы предложили использовать нелинейную композитную метрику стоимости:

$$f(p) = \max_{1 \leq i \leq k} \left( \frac{f_i(p)}{l_i} \right). \quad (5)$$

Идея применения нелинейной метрики стоимости представлена на рис. 3. В идеальном случае поиск должен производиться таким образом, чтобы исключить выбор решений за пределами ограниченной области и тем самым избегать случаев, представленных на рис. 2.

Проблема заключается в том, что при использовании нелинейной метрики стоимости каждый подпуть кратчайшего пути не обязательно является кратчайшим путём, что не позволяет использовать алгоритм Дейкстры для поиска кратчайшего пути по данной метрике. Для решения указанной проблемы авторы алгоритма предлагают сохранять в очереди для каждой вершины все недоминируемые и отбрасывать все доминируемые пути, что позволит в конечном итоге получить решение, если оно существует.

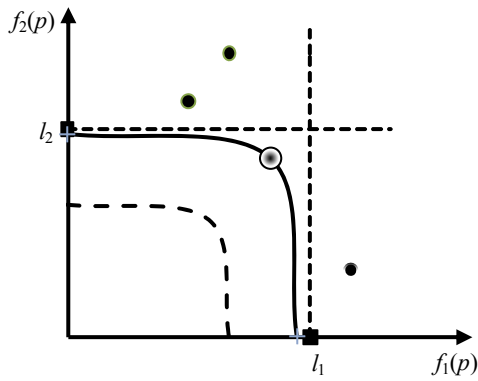


Рис. 3. Пример нахождения подходящего кратчайшего пути по нелинейной метрике с двумя ограничениями

Ещё одна техника, помимо исключения доминируемых путей, которая позволит сократить пространство поиска, заключается в прогнозировании значения стоимости пути на основе значения стоимости оставшегося подпути до узла назначения (Look-Ahead Concept). Данная техника предполагает предварительное построение дерева кратчайших путей от вершины узла назначения до всех остальных вершин в сети независимо по каждой рассматриваемой метрике. В результате, имея для некоторой вершины  $u$  точную нижнюю оценку пути до узла назначения  $t$  отдельно по каждой метрике  $f_i(p_{i;u \rightarrow t})$ , можно оценить минимально возможное итоговое значение всех метрик для полного маршрута от отправителя до получателя и исключить из рассмотрения пути, для которых значение хотя бы одной метрики выходит за пределы ограничений, т.е. не выполняется условие

$$f_i(p_{s \rightarrow u}) + f_i(p_{i;u \rightarrow t}) \leq l_i, \quad i=1,2,\dots,k. \quad (6)$$

Кроме того, для каждого сохраняемого в очереди узла маршрута можно оценить минимально возможное итоговое значение метрики стоимости и использовать это значение для сортировки маршрутов в очереди узла.

Поскольку алгоритм SAMCRA является точным, в очереди каждой вершины сохраняются все недоминируемые пути, которые в дальнейшем используются для поиска решения. В процессе поиска количество недоминируемых путей в очередях вершин быстро возрастает, поэтому в сетях с большим количеством узлов время работы алгоритма становится неприемлемым. Ускорить решение задачи позволяют эвристические подходы и алгоритмы. Примером такого подхода является алгоритм TAMCRA, отличие которого от SAMCRA заключается в том, чтобы хранить в очередях узлов не все, а только заданное число  $m$  недоминируемых путей. Уменьшая указанный параметр алгоритма, можно сократить время его выполнения. Алгоритм имеет временную сложность  $O(m \cdot n \cdot \log(m \cdot n) + m^2 \cdot k \cdot r)$ , где  $r$  – общее количество каналов связи. Нахождение решения в этом случае не гарантируется, тем не менее такой подход может являться практически применимым [30].

Развитие указанного подхода было предложено в рамках эвристического алгоритма H\_MCOP [31]. Указанный алгоритм также использует предварительное построение дерева кратчайших путей от вершины узла назначения  $t$  до всех остальных вершин в сети на основе алгоритма Дейкстры по комбинированной линейной метрике (4). Поскольку метрика является линейной, в ходе дальнейшего поиска можно гарантировать оптимальность маршрута по указанной метрике (поскольку каждый подпуть кратчайшего пути по данной метрике обязательно является кратчайшим путём по данной метрике).

После завершения построения указанного дерева производится поиск кратчайшего пути от узла источника  $s$  до узла назначения  $t$  на основе модифицированного алгоритма Дейкстры.

Рассматривая на каждом шаге алгоритма некоторую вершину  $u$ , эвристически определяется возможный путь  $p$  из  $s$  в  $t$  через данную вершину и оценивается значение метрики для предварительно определенного значения  $\lambda$ :

$$f^{(\lambda)}(p) = \sum_{i=1}^k \left( \frac{f_i(p)}{l_i} \right)^\lambda, \quad \lambda \geq 1. \quad (7)$$

Сам возможный путь  $p$  через вершину  $u$  определяется в результате слияния пройденного подпути из вершины  $s$  до вершины  $u$  и предварительного определенного кратчайшего подпути из вершины  $u$  в вершину  $t$  с минимальным значением метрики (4). Таким образом, до того момента, как будет достигнута вершина  $t$ , может быть определено несколько возможных путей до данной вершины. Если сразу несколько из них являются подходящими, в качестве решения выбирается путь с минимальным значением метрики (4).

Выбор значения  $\lambda$  может влиять на результативность алгоритма. Несмотря на то, что в целом результативность алгоритма при увеличении  $\lambda$  возрастает, возможны ситуации, когда подходящие решения не могут быть найдены при более высоких значениях  $\lambda$ . Алгоритм имеет временную сложность  $O(n \cdot \log(n) + k \cdot r)$ .

Указанный алгоритм с композитной нелинейной метрикой стоимости был реализован в рамках расширения протокола OLSR в [32]. Авторы работы акцентировали внимание на то, что расширение поддерживает произвольное количество показателей качества маршрутов, но в рамках симуляции использовали только два ограничения (задержка, потери пакетов).

Учитывая высокую сложность поиска полного набора эффективных решений для задачи многокритериальной маршрутизации, можно увеличить скорость поиска решений, понизив его точность. Это приводит к разработке алгоритмов, которые дают грубое представление множества Парето, но выполняются за полиномиальное время.

Пусть  $\epsilon > 0$  будет константой, представляющей желаемую точность. Тогда можно ослабить свойство

доминирования (3) и определить, что некоторый путь  $p'$   $\varepsilon$ -доминирует другой путь  $p^*$ , если:

$$\begin{aligned} (1+\varepsilon) \cdot f_i(p^*) &\geq f_i(p'), \quad \forall i \in [1, k], \\ \exists j \in [1, k] : (1+\varepsilon) \cdot f_j(p^*) &> f_j(p'). \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда некоторый алгоритм является схемой  $\varepsilon$ -аппроксимации тогда, и только тогда, когда он позволяет найти путь  $p'$ , для которого

$$\frac{|f(p') - f(p)|}{|f(p)|} \leq \varepsilon, \quad (9)$$

где  $p$  – это оптимальный путь, а  $f$  – целевая функция.

Альтернативная формулировка, которая часто используется для аппроксимации проблемы МСР, заключается в следующем. Для заданной константы  $\varepsilon \in (0, 1)$  некоторый алгоритм является схемой  $(1-\varepsilon)$ -аппроксимации, если он позволяет найти решение  $p'$ , удовлетворяющее (2), в то время как существует путь  $p$  такой, что

$$f_i(p) \leq (1-\varepsilon) \cdot l_i, \quad i=1, 2, \dots, k. \quad (10)$$

В этом случае путь  $p$  можно называть сверхподходящим. Однако разработка алгоритма в соответствии с указанным определением имеет существенный недостаток. Если условие (10) выполнено, то подходящий путь будет гарантированно найден. Но если (10) не выполняется, то алгоритм может не найти подходящий путь, даже если он существует.

Возможное решение заключается в увеличении (ослаблении) ограничений  $l_i$  в  $1/(1-\varepsilon)$  раз так, чтобы путь  $p$  был сверхподходящим для кортежа ограничений  $L'$ , где

$$l_i' = \frac{l_i}{(1-\varepsilon)}, \quad i=1, 2, \dots, k. \quad (11)$$

Алгоритм, разработанный исходя из данного допущения, позволит гарантированно найти подходящий путь для кортежа ограничений  $L'$ , если только он существует [33]. Другими словами, предлагаемое решение является схемой  $1/(1-\varepsilon)$ -аппроксимации.

Сахни в [34] описал три техники приближенного решения рассматриваемых задач, известных как масштабирование и округление, разбиение на интервалы и разделение. Техника масштабирования и округления (SR) наиболее часто используется при построении приближенных алгоритмов для обеспечения QoS-маршрутизации. Суть процесса состоит в том, чтобы масштабировать каждое значение показателей качества для всех каналов связи и округлить его до целочисленного значения, а затем использовать точный алгоритм для решения проблемы с масштабированными (целочисленными) значениями, которая больше не является NP-полной. Сахни доказал, что если коэффициент масштабирования выбран надлежащим образом, можно получить приближенную схему полиномиального времени (PTAS).

Интервальное разделение (IP) заключается в том, чтобы разделить целевое пространство на серию интервалов, а затем сохранить не более одной метки на каждом узле для каждого интервала. Это

уменьшает количество меток, которые должны храниться на каждом узле, и, следовательно, время выполнения.

Подобный подход также лежит в основе техники разделения. В этом случае две разные метки используются только в том случае, если разность значений хотя бы для одной из рассматриваемых целевых функций превышает предварительно определенный порог. То есть если два пути до некоторого узла имеют очень близкие целевые векторы, сохраняется только один.

Простая схема аппроксимации на основе техники масштабирования и округления для решения задачи МСОР была предложена в [35]. В рамках первого этапа исходная проблема МСОР с вещественными значениями показателей качества трансформируется в более простую проблему, для которой все значения показателей качества каналов связи, кроме основного, заменяются целыми числами, используя предварительно определенные целочисленные значения  $x_i$ :

$$w_i'(u, v) = \left\lceil \frac{w_i(u, v) \cdot x_i}{l_i} \right\rceil. \quad (12)$$

Далее, используя расширенные алгоритмы Дейкстры и Беллмана-Форда, становится возможным найти решение с минимальным значением основной маршрутной метрики, в то время как значения остальных целочисленных маршрутных метрик находятся в пределах ограничений  $x_i$ . Авторы доказывают, что решение упрощенной проблемы всегда является решением исходной проблемы (обратное неверно), в то время как эффективность поиска решений зависит от выбора  $x_i$ . Более высокие значения  $x_i$  повышают возможность нахождения решений, но увеличивают сложность алгоритма. Для задачи с двумя ограничениями алгоритм имеет временную сложность  $O(x^2 \cdot n^2)$ . Позднее другие схемы приближенного решения задачи МСОР были предложены в работах [36, 37].

### Заключение

В целом, анализируя научные работы, направленные на решение задачи обеспечения качества обслуживания в динамически организуемых сетях на базе протокола OLSR, можно отметить, что наблюдается тенденция к увеличению разнообразия рассматриваемых показателей качества маршрутов. Вместе с тем общее число показателей, рассматриваемых в рамках конкретных решений, как правило, не велико. С одной стороны, это связано со сложностью решения соответствующих алгоритмических задач, рассмотренных в настоящей работе, с другой стороны, в условиях большого числа ограничений задачи часто становятся переограниченными.

Ранее авторами работы была предложена обобщенная формулировка задачи поиска оптимального маршрута с ограничениями MAX-МСОР, применимая для переограниченных случаев. Несмотря на то, что указанная задача является NP-полной, её практическое решение возможно на основе приближен-

ных и эвристических алгоритмов. Построение указанных алгоритмов может быть произведено на основе концепций, предложенных в алгоритмах для решения исходной задачи МСОР. В частности, основу алгоритма может представлять модифицированный алгоритм поиска заданного числа маршрутов с композитной нелинейной метрикой стоимости. Таким образом, в процессе поиска в очереди каждой вершины будет храниться некоторое заданное число недоминируемых путей. При этом применение техники прогнозирования значения стоимости оставшегося подпути до узла назначения не выглядит обоснованным, поскольку в случае решения задачи МАХ-МСОР она не позволит априори исключить неподходящие пути из рассмотрения. Кроме того, для приближенного решения задачи МАХ-МСОР может быть предложена схема аппроксимации на основе техники масштабирования и округления.

Исходя из результатов проведенного анализа, практически применимые алгоритмы для решения задачи МАХ-МСОР будут востребованы в рамках возможного расширения протокола маршрутизации OLSR в целях поддержки «мягкого» обеспечения качества обслуживания по произвольному количеству показателей качества маршрутов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00160.

#### Литература

1. Hanzo L. A survey of QoS routing solutions for mobile ad hoc networks / L. Hanzo, R. Tafazolli // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2007. – Vol. 9, No. 2. – P. 50–70.
2. RFC7181: The Optimized Link State Routing Protocol Version 2 / T. Clausen, C. Dearlove, P. Jacquet, U. Herberg. – 2014. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7181> (дата обращения: 20.12.2018).
3. Ghanem N. Energy Consumption Balancing in OLSR Ad Hoc Wireless Routing Protocol / N. Ghanem, H. Belleili // Applied Mathematics & Information Sciences. – 2016. – Vol. 10, No. 5. – P. 1991–1998.
4. Rango F.D. EE-OLSR: Energy Efficient OLSR Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks / F.D. Rango, M. Fotino, S. Marano // Proc. of Military Communication Conference (MILCOM). – 2008. – P. 1–7.
5. Lakrami F. Energy and mobility in OLSR routing protocol / F. Lakrami, N.El. Kamoun // Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications. – 2014. – No. 3. – P. 1–6.
6. Mahfoudh S. An energy efficient routing based on OLSR in wireless ad hoc and sensor networks / S. Mahfoudh, P. Minet // Proc. of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications-Workshops (AINA '08). – 2008. – P. 1253–1259.
7. Guo Z. Energy aware proactive optimized link state routing in mobile ad-hoc networks / Z. Guo, S. Malakooti, S. Sheikh et al. // Applied Mathematical Modelling. – 2011. – Vol. 35, No. 10. – P. 4715–4729.
8. Joshi R.D. Implementation and analytical modelling of modified optimised link state routing protocol for network lifetime improvement / R.D. Joshi, P.P. Rege // IET Communications. – 2012. – Vol. 6, No. 10. – P. 1270–1277.
9. Ge Y. Quality of service routing in ad-hoc networks using OLSR / Y. Ge, T. Kunz, L. Lamont // Proc. of the 36th

Annual Hawaii International Conference on System Sciences. – 2003. – P. 1–9.

10. Le P.H. Evaluation of the Impact of Interference on Mobile Ad Hoc Network Performance // International Journal of Advanced Research in Computer Science. – 2016. – Vol. 7, No. 3. – P. 20–24.

11. Sinky H. Implementation and performance measurement and analysis of OLSR protocol / H. Sinky, B. Hamdaoui // Proc. of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. – 2010. – P. 286–290.

12. Laven A. Multimetric OLSR and ETT / A. Laven, P. Hjartquist // Proc. of the 5th OLSR Interop & Workshop. – 2009. – P. 1–5.

13. Guo Z. Predictive Delay Metric for OLSR Using Neural Networks / Z. Guo, B. Malakooti // Proc. of the 3rd International ICST Conference on Wireless Internet. – 2007. – P. 1–9.

14. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. – 1959. – Vol. 1. – P. 269–271.

15. Providing Quality of Service for Mesh Networks Using Link Delay Measurements / W. Cordeiro et al. // Proc. of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks. – 2007. – P. 991–996.

16. Benzaid M. Integrating fast mobility in the OLSR routing protocol / M. Benzaid, P. Minet, K. Al Agha // Proc. of the 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network. – 2002. – P. 217–221.

17. Lakrami F. Mobility support in OLSR routing protocol / F. Lakrami, N. El Kamoun // Proc. of the International Conference on Network Computing and Information Security. – 2012. – P. 804–812.

18. Kuipers F. An overview of constraint-based path selection algorithms for QoS routing / F. Kuipers, P.V. Mieghem, T. Korkmaz et al. // IEEE Communications Magazine. – 2002. – Vol. 40, No. 12. – P. 50–55.

19. Щербина О.А. Удовлетворение ограничений и программирование в ограничениях // Интеллектуальные системы. – 2011. – Т. 15, № 1-4. – С. 53–170.

20. Araujo J.N.R. Multicriteria QoS-aware Solution in Wireless Multi-hop Networks / J.N.R. Araujo, C.C. Monteiro, L.S. Batista // Proc. of the Thirteenth International Conference on Wireless and Mobile Communications. – 2017. – P. 17–23.

21. Garroppo R.G. A survey on multi-constrained optimal path computation: Exact and approximate algorithms / R.G. Garroppo, S. Giordano, L. Tavanti // Computer Networks. – 2010. – Vol. 54, No. 17. – P. 3081–3107.

22. Guo Z. Multi-objective OLSR for proactive routing in MANET with delay, energy, and link lifetime predictions / Z. Guo, S. Malakooti, S. Sheikh et al. // Applied Mathematical Modelling. – 2011. – Vol. 35, No. 3. – P. 1413–1426.

23. Boushaba A. An intelligent multipath optimized link state routing protocol for QoS and QoE enhancement of video transmission in MANETs / A. Boushaba, A. Benabbou, R. Benabbou et al. // Computing. – 2016. – Vol. 98, No. 8. – P. 803–825.

24. Sondi P. A multiple-metric QoS-aware implementation of the optimised link state routing protocol / P. Sondi, D. Gantsou, S. Lecomte // International Journal of Communication Networks and Distributed Systems. – 2014. – Vol. 12, No. 4. – P. 381–400.

25. Multiple Metrics-OLSR in NAN for Advanced Metering Infrastructures / Y. Tsado et al. // Proc. of the IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). – 2016. – P. 1–6.

26. Щерба Е.В. Проблема обеспечения качества обслуживания при маршрутизации пакетов в динамически организуемых телекоммуникационных сетях для переог-



раниченных случаев / Е.В. Щерба, Г.А. Литвинов, М.В. Щерба // Электронные средства и системы управления: матер. XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Томск: ТУСУР, 2018. – Т. I. – С. 28–31.

27. Bellman R. On a routing problem // *Quarterly of Applied Mathematics*. – 1958. – Vol. 16, No. 1. – P. 87–90.

28. Jaffe J.M. Algorithms for finding paths with multiple constraints // *Networks*. – 1984. – Vol. 14, No. 1. – P. 95–116.

29. Van Mieghem P. Concepts of exact QoS routing algorithms / P. Van Mieghem, F.A. Kuipers // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2004. – Vol. 12, No. 5. – P. 851–864.

30. De Neve H. TAMCRA: a tunable accuracy multiple constraints routing algorithm / H. De Neve, P. Van Mieghem // *Computer Communications*. – 2000. – Vol. 23, No. 7. – P. 667–679.

31. Korkmaz T. Multi-constrained optimal path selection / T. Korkmaz, M. Krunch // *Proc. of the Conference on Computer Communications, 2001, IEEE Infocom*. – 2001. – Vol. 2. – P. 834–843.

32. Kunavut K. Multi-Constrained Path (MCP) QoS Routing in OLSR based on Multiple Additive QoS Metrics / K. Kunavut, T. Sanguankotchakorn // *Proc. of the 10th International Symposium on Communications and Information Technologies*. – 2010. – P. 226–231.

33. Xue G. Finding a path subject to many additive QoS constraints / G. Xue, A. Sen, W. Zhang et al. // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2007. – Vol. 15, No. 1. – P. 201–211.

34. Sahni S. General Techniques for Combinatorial Approximation // *Operations Research*. – 1977. – Vol. 25, No. 6. – P. 920–936.

35. Chen S. On finding multi-constrained paths / S. Chen, K. Nahrstedt // *Proc. of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*. – 1998. – Vol. 2. – P. 874–879.

36. Tsaggouris G. Multiobjective optimization: improved FPTAS for shortest paths and non-linear objectives with applications / G. Tsaggouris, C. Zaroliagis // *Theory of Computing Systems*. – 2009. – Vol. 45, No. 1. – P. 162–186.

37. Xue G. Polynomial time approximation algorithms for multi-constrained QoS routing / G. Xue, W. Zhang, J. Tang et al. // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2008. – Vol. 16, No. 3. – P. 656–669.

#### Щерба Евгений Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф.  
комплексной защиты информации (КЗИ)  
Омского государственного технического университета (ОмГТУ)  
Мира пр-т, 11, г. Омск, Россия, 644050  
ORCID 0000-0003-4401-4343  
Тел.: +7 (381-2) 21-77-02  
Эл. почта: evscherba@gmail.com

#### Литвинов Георгий Александрович

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

#### Щерба Мария Витальевна

Канд. техн. наук, доцент каф. КЗИ ОмГТУ  
Мира пр-т, 11, г. Омск, Россия, 644050  
Тел.: +7 (381-2) 21-77-02  
Эл. почта: mariz3@mail.ru

Shcherba E.V., Litvinov G.A., Shcherba M.V.

#### Providing QoS based on the OLSR routing protocol: problems, algorithms and solutions

The paper presents an overview the issues related to ensuring quality of service based on the OLSR routing protocol within the framework of the graph-combinatorial approach. Despite a significant number of solutions based on a single routing metric, the extensions of the protocol, which take into account multiple metrics, are of particular practical interest. The authors classified existing problem statements and analyzed the main algorithmic approaches and solutions. Based on the research, promising directions for solving the generalized problem of finding the multi-constrained optimal path relevant in dynamically organized networks are proposed.

**Keywords:** multi-objective routing, multi-constrained routing, quality of service, MANET.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-55-65

#### References

1. Hanzo L., Tafazolli R. A survey of QoS routing solutions for mobile ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2007, vol. 9, no. 2, pp. 50–70.
2. Clausen T., Dearlove C., Jacquet P., Herberg U. RFC7181: The Optimized Link State Routing Protocol Version 2. 2014. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc7181> (accessed: December 20, 2018).
3. Ghanem N., Belleili H. Energy Consumption Balancing in OLSR Ad Hoc Wireless Routing Protocol. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2016, vol. 10, no. 5, pp. 1991–1998.
4. Rango F.D., Fotino M., Marano S. EE-OLSR: Energy Efficient OLSR Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. *Proc. of Military Communication Conference (MILCOM)*, 2008, pp. 1–7.
5. Lakrami F., Kamoun N.E. Energy and mobility in OLSR routing protocol. *Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications*, 2014, no. 3, pp. 1–6.
6. Mahfoudh S., Minet P. An energy efficient routing based on OLSR in wireless ad hoc and sensor networks. *Proc. of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications-Workshops (AINA '08)*, 2008, pp. 1253–1259.
7. Guo Z., Malakooti S., Sheikh S., Al-Najjar C., Lehman M., Malakooti B. Energy aware proactive optimized link state routing in mobile ad-hoc networks. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, vol. 35, no. 10, pp. 4715–4729.
8. Joshi R.D., Rege P.P. Implementation and analytical modelling of modified optimised link state routing protocol for network lifetime improvement. *IET Communications*, 2012, vol. 6, no. 10, pp. 1270–1277.
9. Ge Y., Kunz T., Lamont L. Quality of service routing in ad-hoc networks using OLSR. *Proc. of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2003, pp. 1–9.
10. Le P.H. Evaluation of the Impact of Interference on Mobile Ad Hoc Network Performance. *International Journal*

of *Advanced Research in Computer Science*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 20–24.

11. Sinky H., Hamdaoui B. Implementation and performance measurement and analysis of OLSR protocol. *Proc. of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 2010, pp. 286–290.

12. Laven A., Hjartquist P. Multimetric OLSR and ETT. *Proc. of the 5th OLSR Interop & Workshop*, 2009, pp. 1–5.

13. Guo Z., Malakooti B. Predictive Delay Metric for OLSR Using Neural Networks. *Proc. of the 3rd International ICST Conference on Wireless Internet*, 2007, pp. 1–9.

14. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, vol. 1, pp. 269–271.

15. Cordeiro W., Aguiar E., Junior W.M., Abelem A., Stanton M. Providing Quality of Service for Mesh Networks Using Link Delay Measurements. *Proc. of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks*, 2007, pp. 991–996.

16. Benzaid M., Minet P., Al Agha K. Integrating fast mobility in the OLSR routing protocol. *Proc. of the 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*, 2002, pp. 217–221.

17. Lakrami F., El Kamoun N. Mobility support in OLSR routing protocol. *Proc. of the International Conference on Network Computing and Information Security*, 2012, pp. 804–812.

18. Kuipers F., Mieghem P.V., Korkmaz T., Krunz M. An overview of constraint-based path selection algorithms for QoS routing. *IEEE Communications Magazine*, 2002, vol. 40, no. 12, pp. 50–55.

19. Shcherbina O.A. Constraint satisfaction and constraint programming. *Intelligent Systems*, 2011, vol. 15, no. 1-4, pp. 53–170 (in Russ.).

20. Araujo J.N.R., Monteiro C.C., Batista L.S. Multicriteria QoS-aware Solution in Wireless Multi-hop Networks. *Proc. of the Thirteenth International Conference on Wireless and Mobile Communications*, 2017, pp. 17–23.

21. Garroppo R.G., Giordano S., Tavanti L. A survey on multi-constrained optimal path computation: Exact and approximate algorithms. *Computer Networks*, 2010, vol. 54, no. 17, pp. 3081–3107.

22. Guo Z., Malakooti S., Sheikh S., Al-Najjar C., Lehman M., Malakooti B. Multi-objective OLSR for proactive routing in MANET with delay, energy, and link lifetime predictions. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, vol. 35, no. 3, pp. 1413–1426.

23. Boushaba A., Benabbou A., Benabbou R., Zahi A., Oumiss M. An intelligent multipath optimized link state routing protocol for QoS and QoE enhancement of video transmission in MANETs. *Computing*, 2016, vol. 98, no. 8, pp. 803–825.

24. Sondi P., Gantsou D., Lecomte S. A multiple-metric QoS-aware implementation of the optimised link state routing protocol. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 381–400.

25. Tsado Y., Gamage K.A.A., Lund D., Adebisi B. Multiple Metrics-OLSR in NAN for Advanced Metering Infrastructures. *Proc. of the IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 2016, pp. 1–6.

26. Shcherba E.V., Litvinov G.A., Shcherba M.V. Problema obespecheniya kachestva obsluzhivaniya pri marshrutizatsii paketov v dinamicheski organizuemih telekommunikatsionnyh setyah dlya pereogranichennyh sluchaev [The problem of QoS-based routing in dynamically organized telecommunication networks in overconstrained cases]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy chetyrnadcatoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii [Elec-*

*tronic Devices and Control Systems. Proc. of the fourteenth International scientific conference]*. Tomsk, TUSUR Publ., 2018, vol. I, pp. 28–31.

27. Bellman R. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1958, vol. 16, no. 1, pp. 87–90.

28. Jaffe J.M. Algorithms for finding paths with multiple constraints. *Networks*, 1984, vol. 14, no. 1, pp. 95–116.

29. Mieghem P. V., Kuipers F.A. Concepts of exact QoS routing algorithms. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, vol. 12, no. 5, pp. 851–864.

30. De Neve H., Mieghem P. V. TAMCRA: a tunable accuracy multiple constraints routing algorithm. *Computer Communications*, 2000, vol. 23, no. 7, pp. 667–679.

31. Korkmaz T., Krunz M. Multi-constrained optimal path selection. *Proc. of the Conference on Computer Communications*, IEEE Infocom, 2001, vol. 2, pp. 834–843.

32. Kunavut K., Sanguankotchakorn T. Multi-Constrained Path (MCP) QoS Routing in OLSR based on Multiple Additive QoS Metrics. *Proc. of the 10th International Symposium on Communications and Information Technologies*, 2010, pp. 226–231.

33. Xue G., Sen A., Zhang W., Tang J., Thulasiraman K. Finding a path subject to many additive QoS constraints. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007, vol. 15, no. 1, pp. 201–211.

34. Sahni S. General Techniques for Combinatorial Approximation. *Operations Research*, 1977, vol. 25, no. 6, pp. 920–936.

35. Chen S., Nahrstedt K. On finding multi-constrained paths. *Proc. of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1998, vol. 2, pp. 874–879.

36. Tsaggouris G., Zaroliagis C. Multiobjective optimization: improved FPTAS for shortest paths and non-linear objectives with applications. *Theory of Computing Systems*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 162–186.

37. Xue G., Zhang W., Tang J., Thulasiraman K. Polynomial time approximation algorithms for multi-constrained QoS routing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, vol. 16, no. 3, pp. 656–669.

---

#### **Evgeny V. Shcherba**

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

#### **George A. Litvinov**

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

#### **Maria V. Shcherba**

Candidate of Engineering, Senior Lecturer of Department of Complex Information Protection, OmSTU 11, Mira pr., Omsk, Russia, 644050  
Phone: +7 (381-2) 21-77-02  
Email: mariz3@mail.ru

УДК 004.421.6:519.115.1

Е.Ю. Мищенко, А.Н. Соколов

## Алгоритмы реализации методов обезличивания персональных данных в распределенных информационных системах

Рассматриваются различные методы защиты персональных данных (ПД), основанные на применении процедуры обезличивания, а также методика оценки эффективности обезличивания. Актуальность применения обезличивания состоит в том, что в отличие от других методов защиты (в том числе шифрования), затраты на обезличивание не зависят от количества рабочих мест, обрабатывающих ПД, что позволяет получить определенный экономический эффект при построении системы защиты. Авторы приводят описание характеристик различных методов обезличивания, которые оказывают наибольшее влияние на реализацию данных методов, а также дают обзор реализованных алгоритмов в различных сферах обработки ПД. Кроме того, приводятся результаты оценки эффективности обезличивания ПД, полученные при применении метода введения идентификаторов в сфере здравоохранения. В результате внедрения была достигнута достаточная степень защищенности ПД, а также был получен значительный экономический эффект.

**Ключевые слова:** вероятность идентификации, информационная система, метод введения идентификаторов, метод изменения состава или семантики, метод перемешивания, обезличивание персональных данных, степень обезличивания.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-7-66-70

Активные методы защиты информации основаны на использовании сертифицированных средств защиты информации, интегрированных в операционную среду обработки ПД. Стоимость применения таких средств пропорциональна количеству рабочих мест. Обезличивание ПД имеет главной целью обеспечение попыток злоумышленника использовать открытую информацию во вред физическому лицу. Поскольку этот метод защиты не требует применения средств защиты, достигается еще одна цель – значительная экономия средств.

Российское законодательство так же, как и законодательство США и ЕС, предъявляет жесткие требования к защите ПД, поэтому задача их обезличивания является актуальной. Главная особенность российского законодательства заключается в том, что в соответствии с Законом «О персональных данных» [1], обезличивание не позволяет определить принадлежность ПД физическому лицу без применения дополнительной информации, т.е. наиболее важным свойством обезличенных данных является возможность их деобезличивания, а отсутствие такой возможности признается лишь как частный случай. Таким образом, в России для процесса обезличивания установлена одинаковая актуальность для прямой и обратной задачи.

Начиная с 2009 г. в России было предложено множество алгоритмов реализации процесса обезличивания, но только в 2013 г. приказом Роскомнадзора [2] были определены четыре основных метода обезличивания: введение идентификаторов, изменение состава или семантики, декомпозиция и перемешивание (таблица).

Из таблицы видно, что:

– методы идентификаторов и декомпозиции основаны на отделении идентифицирующей информации от обезличенных данных, поэтому для них общей проблемой является обеспечение связи разде-

ленных частей во время сеанса работы. При этом идентифицирующая часть недоступна для злоумышленника во время хранения, но может быть доступна во время прочих сеансов обработки (ввод, вывод). Следует отметить, что с точки зрения реализации алгоритмы этих двух методов принципиально очень близки, поэтому далее будем рассматривать их совместно;

– методы изменения состава/семантики и перемешивания основаны на скрытии расположения идентифицирующей информации в массиве обезличенных данных, поэтому для них общей проблемой является обеспечение безопасности алгоритма во время сеанса работы. При этом идентифицирующая часть является общедоступной, поэтому есть опасность вычисления алгоритма злоумышленником в любых режимах работы;

– общей, хотя и менее критичной проблемой для всех методов является выбор группы идентифицирующих атрибутов. Причиной данной проблемы является отсутствие методики количественной оценки эффективности обезличивания;

– общей проблемой, важной с точки зрения затрат, является необходимость модификации структуры базы данных и прикладного программного обеспечения для реализации метода обезличивания. В случае разработки программного обеспечения посторонней организацией требуемая модификация может оказаться экономически невыгодной и технически невозможной.

Рассмотрим варианты реализации методов обезличивания персональных данных с учетом имеющегося опыта их внедрения.

### Методы обезличивания персональных данных

Основанием для анализа состояния проблемы является исследование имеющихся научных публикаций по теме обезличивания ПД в России, а также

собственные разработки авторов. Все направления исследований можно условно разделить на четыре группы по применяемым методам обезличивания.

**Методы обезличивания персональных данных**

Метод	Принцип работы	Секретность	Проблемы
Введение идентификаторов	Группа идентифицирующих атрибутов заменяется абстрактным идентификатором, группа хранится в отдельной таблице	Таблица перекрестных ссылок	– Выбор состава идентифицирующей группы. – Генерация идентификатора. – Обеспечение связи между таблицей и обезличенными данными
Изменение состава или семантики	Изменяется структура (количество, положение и размер полей) или изменяется значение идентифицирующих атрибутов	Алгоритм модификации	– Выбор состава идентифицирующей группы. – Генерация алгоритма модификации. – Обеспечение секретности алгоритма модификации
Декомпозиция	База данных разделяется на много частей, информация о связях хранится в отдельной таблице	Таблица связей	– Выбор состава частей. – Генерация алгоритма связывания. – Обеспечение связи между частями
Перемещение	Группа идентифицирующих атрибутов перемещается в запись другого человека	Алгоритм перемещения	– Выбор состава идентифицирующей группы. – Генерация алгоритма перемещения. – Обеспечение секретности алгоритма перемещения

1. *Алгоритмы реализации метода введения идентификаторов.* Эта группа представлена работами, часть которых рассматривает различные криптографические методы генерации идентификатора связи между таблицей перекрестных ссылок и обезличенной базой. Например, уникальный и релевантный идентификатор физического лица получен путем использования односторонней криптографической функции от атрибутов фамилии, имени, отчества и даты рождения физического лица О.А. Вишняковой и Д.Н. Лавровым [3]. Однако решение вопросов связи и безопасности сеансов обработки данных остаются за рамками этой и подобных работ.

Имеется патент на способ идентификации субъекта персональных данных с использованием в качестве идентификатора связи сим-карты, предложенный Е.С. Волокитиной [4]. Метод успешно внедрен в организациях сферы образования. Представленный алгоритм успешно решает проблему безо-

пасности во время сеансов обработки обезличенных данных, однако использование дополнительного идентификатора усложняет процесс обработки и повышает затраты. Схема реализации с использованием внешнего идентификатора представлена на рис. 1.

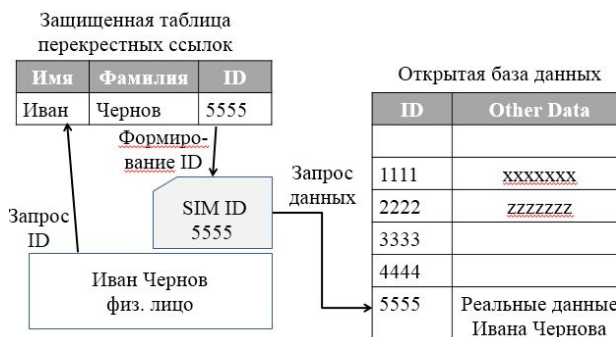


Рис. 1. Схема реализации с использованием SIM-карты

Для обеспечения экономической эффективности Д.Н. Ивановым и Е.Ю. Мищенко предложена полезная модель, получившая патент [5] и внедренная на предприятиях сферы здравоохранения.

Запатентованный метод в качестве идентификатора связи предлагает использовать бумажный носитель – бланк рецепта на получение лекарств. Такой идентификатор является частью технологического процесса и не вносит дополнительных сложностей и затрат при обработке данных, а сам технологический процесс предполагает размещение обезличенной базы данных локально во всех аптечных пунктах. Технологический процесс и соответствующее программное обеспечение обработки рецептов модернизированы путем автоматизированного считывания идентификаторов с бумажного носителя. Полный двусторонний обмен данными с центром обработки данных на сервере был заменен на односторонний обмен обезличенными данными от аптечного пункта к серверу. При этом на рабочих местах во время сеансов вместо чувствительных персональных данных используются абстрактные идентификаторы. Таким образом, установка средств защиты информации в аптечных пунктах не требуется, что в масштабах региона (около 100 аптечных пунктов) дает экономию более 1,5 млн руб.

А.А. Халафян и А.А. Кошкарров [6], в качестве идентификатора связи также предлагают использовать бланк рецепта на получение лекарств, но технологический процесс при этом предполагает размещение обезличенной базы данных в общем доступе в облаке с использованием каналов Интернета, что позволяет централизовать и ускорить обработку данных. Однако при этом на рабочих местах во время сеансов используются как идентификаторы, так и чувствительные атрибуты. Таким образом, все рабочие места требуют установки средств криптографической защиты и межсетевое экранирование, что не позволяет получить экономического эффекта в аптечных пунктах. Тем не менее этот метод был вне-

дрен в распределенную информационную систему сферы здравоохранения.

2. *Алгоритмы реализации метода изменения состава или семантики.* Это направление представлено работой И.Ю. Кучина [7], в которой предлагается способ кодирования идентифицирующих атрибутов на базе разработанного алгоритма. Отличительной особенностью работы является аналитическое обоснование выбора состава идентифицирующей группы и обеспечение заданной степени анонимности в обезличенной базе. Этот метод получил внедрение в сфере здравоохранения, однако вопрос обеспечения безопасности решается только при хранении персональных данных, но не для прочих режимов обработки информации.

3. *Алгоритмы реализации метода перемешивания.* Направление представлено работами, которые предлагают использование алгоритмов перемешивания, ориентированных на хранение ПД, либо на их передачу по открытым каналам связи. Например, К.О. Бондаренко и В.А. Козлов [8] представляют способ перемешивания данных внутри сегментов с последовательным перемешиванием строк и чувствительных атрибутов, причем в алгоритме используются таблицы подстановки, сгенерированные криптографическим методом гаммирования. Применение криптографии, с одной стороны, гарантирует стойкость алгоритма даже во время сеанса обработки, но, с другой стороны, усложняет процесс добавления/удаления/поиска данных и повышает затраты на защиту. Эти недостатки являются препятствием для внедрения метода.

Среди внедренных можно отметить работу М.И. Денисова и К.А. Чехонина [9]. Однако обезличенная база используется только внутри контролируемой зоны, а для передачи данных используются средства шифрования.

В.В. Воронин и Н.Л. Нехай [10] разработали алгоритм с многочисленными циклическими сдвигами в подмножествах каждого чувствительного атрибута и внедрили его в систему CRM-учета клиентов и работников предприятия по обслуживанию автотранспорта. Для хранения параметров перемешивания используются криптографические средства, что также повышает затраты на систему защиты.

4. *Прочие алгоритмы обезличивания.* Прочие направления исследований предполагают использование в основном криптографических методов (off-line либо on-line обезличивание с помощью инструментов баз данных), которые могут быть отнесены к обезличиванию с достаточной степенью условности, поскольку решают проблему невозможности идентификации физического лица по обработанным данным, но формально не входят в набор методов, установленных Роскомнадзором [2], либо используют эти методы частично. Например, работа Ю.В. Трифоновой и Р.Ф. Жаринова [11] предлагает использование встроенных криптографических средств СУБД СтуртДВ. В качестве примера частичного использования метода идентификаторов можно при-

вести работу И.М. Ажмухамедова, Р.Ю. Деминой и И.В. Сафарова [12], где применяется шифрование таблицы перекрестных ссылок с последующим блокированием.

### Результаты реализации методов обезличивания персональных данных

К сожалению, отсутствие общепринятой методики количественной оценки эффективности обезличивания не позволяет сравнивать результаты обезличивания данных, осуществляемого различными методами.

С целью решения проблемы предложены методики расчета эффективности обезличивания данных с использованием показателей вероятности идентификации (ВИ) и степени обезличивания для методов введения идентификаторов [13], изменения состава или семантики [14] и перемешивания [15]. На рис. 2 показаны значения ВИ для различных реквизитов, рассчитанные по методике [13] для метода введения идентификаторов до модернизации (контрольный вариант) и после нее. Критичным для идентификации является уровень  $ВИ=0,01$ . *PeopleFullName* – чувствительный атрибут ( $ВИ=1$  исключен при модернизации). *HospitalID* – нечувствительный атрибут ( $ВИ=0,0027$ , необходимый идентификатор). *PeopleBirthday* – нечувствительный атрибут ( $ВИ=0,0014$  исключен при модернизации, так как пара атрибутов *HospitalID+PeopleBirthday* является чувствительной:  $ВИ=0,75$ ).

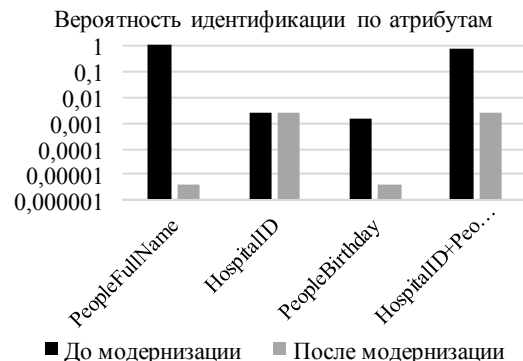


Рис. 2. Изменение вероятности идентификации при внедрении метода идентификаторов

Показатель степени обезличивания является интегральной характеристикой для всей совокупности атрибутов физических лиц. До модернизации его значение равно нулю из-за наличия чувствительных атрибутов в базе данных. После модернизации значение степени обезличивания достигло 0,997, что явно лучше критического уровня 0,99.

Таким образом, применение обезличивания (с обязательной возможностью деобезличивания) может обеспечить эффективную защиту персональных данных. Опыт внедрения методов обезличивания в России за последние 5 лет нельзя назвать достаточным, но он позволяет оценить некоторые тенденции. Наиболее важной представляется зависимость эффективности обезличивания от метода обезличива-

ния. Несмотря на отсутствие методической базы оценки эффективности, достаточно уверенно можно утверждать, что наиболее эффективным с точки зрения обеспечения безопасности ПД является метод введения идентификаторов.

Надежные оценки экономической эффективности внедрений делать сложно, поскольку цель получения экономического эффекта преследовалась не во всех случаях. С целью более широкого внедрения различных методов обезличивания персональных данных предполагается совершенствование методики оценки эффективности обезличивания в направлении, позволяющем сформировать соответствующую нормативную базу.

Работа выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.А03.21.0011.

### Литература

1. Федеральный закон от 27.07.2006 «О персональных данных» № 152-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_61801/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/), свободный (дата обращения: 14.05.2018).
2. Приказ Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций от 05.09.2013 № 996 «Об утверждении требований и методов по обезличиванию персональных данных» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://54.rkn.gov.ru/protection/acts/p13580/>, свободный (дата обращения: 14.05.2018).
3. Вишнякова О.А. Формат обмена данными в системе сбора и обработки биометрических образцов / О.А. Вишнякова, Д.Н. Лавров // Информационные ресурсы в образовании: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2013. – С. 146–149.
4. Волокитина Е.С. Метод и алгоритмы гарантированного обезличивания и реидентификации субъекта персональных данных в автоматизированных информационных системах: дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского нац. исслед. ун-та информационных технологий, механики и оптики, 2013. – 183 с.
5. Пат. RU 103 414 U8, МПК G06F 17/40 (2006.01). Система взаимодействия разделенных баз персональных данных информационной системы / Д.Н. Иванов (RU), Е.Ю. Мищенко (RU). – № 2010149391/08; заявл. 02.12.2010; опубл. 10.04.2011. Бюл. № 10. – 2 с.
6. Кошкарлов А.А. Система управления базами данных льготного лекарственного обеспечения в Краснодарском крае с использованием облачных технологий / А.А. Халафян, А.А. Кошкарлов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубан. гос. аграрного ун-та. – Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2015. – № 109 (05). – С. 451–467.
7. Кучин И.Ю. Обработка баз данных с персонифицированной информацией для задач обезличивания и поиска закономерностей: дис. ... канд. техн. наук. – Астрахань: Изд-во Астрах. гос. техн. ун-та, 2012. – 132 с.
8. Бондаренко К.О. Универсальный быстродействующий алгоритм процедур обезличивания данных / К.О. Бондаренко, В.А. Козлов // Изв. ЮФУ. Технические науки. – Ростов/н/Д: Изд-во ЮФУ, 2015. – № 11 (172). – С. 130–142.
9. Денисов М.И. Защита персональных данных в информационной системе медицинского учреждения методом обезличивания / М.И. Денисов, К.А. Чехонин // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – Хабаровск: Изд-во Дальневосточного гос. ун-та путей сообщения, 2013. – Т. 1. – С. 229–232.
10. Воронин В.В. Защита персональных данных в информационных системах методом обезличивания / В.В. Воронин, Н.Л. Нехай // Информационные технологии XXI века: сб. науч. тр. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2017. – С. 479–483.
11. Трифонова Ю.В. Возможности обезличивания персональных данных в системах, использующих реляционные базы данных / Ю.В. Трифонова, Р.Ф. Жаринов // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 2 (32). – С. 188–194.
12. Ажмухамедов И.М. Системный подход к обеспечению конфиденциальности обезличенных персональных данных в учреждениях здравоохранения / И.М. Ажмухамедов, Р.Ю. Демина, И.В. Сафаров // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18610/>, свободный (дата обращения: 16.11.2018).
13. Мищенко Е.Ю. Количественный анализ процедуры обезличивания персональных данных. Метод введения идентификаторов / Е.Ю. Мищенко, А.Н. Соколов // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2015. – Т. 15, № 3. – С. 18–25.
14. Мищенко Е.Ю. Количественный анализ процедуры обезличивания персональных данных. Метод изменения состава или семантики / Е.Ю. Мищенко, А.Н. Соколов // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2016. – № 1 (19). – С. 30–38.
15. Мищенко Е.Ю. Количественный анализ процедуры обезличивания персональных данных. Метод перемешивания / Е.Ю. Мищенко, А.Н. Соколов // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2016. – № 3 (21). – С. 30–37.

---

### Мищенко Евгений Юрьевич

Ст. преподаватель каф. защиты информации  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)  
Ленина пр-т, 76, г. Челябинск, Россия, 454080  
Тел.: +7 (351) 267-93-55  
Эл. почта: mishchenkoei@susu.ru

### Соколов Александр Николаевич

Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. защиты информации  
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»  
Ленина пр-т, 76, г. Челябинск, Россия, 454080  
Тел.: +7 (351) 267-93-55  
Эл. почта: sokolovan@susu.ru

Mishchenko E. Yu., Sokolov A. N.

### Implementation algorithms for the methods of personal data depersonalization in distributed information systems

The article deals with various methods of personal data protection, based on the use of depersonalization procedures, as well as methods for assessing the efficiency of depersonalization.

The relevance of the use of depersonalization is conditioned by the fact that unlike other methods of personal data protection (i.e. the encryption), the cost of depersonalization does not depend on the number of points of the processing of personal data. That can provide certain economic benefits. The authors describe the characteristics of different depersonalization methods that have an important impact on the implementation of those methods and also give an overview of the implemented algorithms in various fields of personal data processing. In addition, the authors present the results of evaluating the effectiveness of depersonalization of personal data in the health sector obtained by the method of identifiers. As a result of the implementation, a sufficient degree of protection of personal data was achieved, and a significant economic effect was obtained.

**Keywords:** probability of identification, information system, method of introducing identifiers, method of changing the composition or semantics, method of mixing, depersonalization of personal data, degree of depersonalization.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-7-66-70

### References

1. Federal'nyi zakon ot 27.07.2006 № 152 «O personal'nyh dannyh» (In Russ.). Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_61801/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/) (accessed: May 14, 2018).
2. Prikaz Federal'noj sluzhby po nadzoru v sfere svyazi, informacionnyh tekhnologij i massovyh kommunikacij ot 05.09.2013 № 996 «Ob utverzhdenii trebovanij i metodov po obezlichivaniyu personal'nyh dannyh» (in Russ.). Available at: <http://54.rkn.gov.ru/protection/acts/p13580/> (accessed: May 14, 2018).
3. Vishnyakova O.A., Lavrov D.N. The data exchange format in the system for the collection and processing of biometric samples. Information resources in education: materials of International scientific-practical conference. Nizhnevartovsk: Publishing house of Nizhnevartovsk State University, pp. 146–149, 2013 (in Russ.).
4. Volokitina E.S. Method and algorithms of guaranteed depersonalization and reidentification the subject of personal data in automated information systems. Thesis of candidate of technical Sciences. Saint-Petersburg: Publishing house of Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2013, 183 p. (in Russ.).
5. Pat. RU 103 414 U8, МПК G06F 17/40 (2006.01). Ivanov D.N. (RU), Mishchenko E.Yu. (RU). The communication System of the divided personal databases of the information system. № 2010149391/08, decl. 02 Dec. 2010, publ. 10 Apr. 2011, Bull. no 10, 2 p. (in Russ.).
6. Khalafyan A.A., Koshkarov A.A. The database management system of preferential drug supply in the Krasnodar region with the use of cloud technologies. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban state agrarian University. Krasnodar: Publishing house of the Kuban State Agrarian University*, 2015, no. 109 (05), pp. 451–467. (in Russ.).
7. Kuchin I.Yu. Processing databases with personal information for the purposes of depersonalization and finding patterns, Thesis of Candidate of Engineering. Astrakhan: publishing house of the Astrakhan state technical University, 2012, 132 p. (in Russ.).
8. Bondarenko K.O., Kozlov V.A. A universal fast algorithm procedures for the depersonalization of data. *Izvestiya YuFU. Technical Sciences. Rostov-on-Don: publishing house of the Southern Fed. University press*, 2015, no. 11 (172), pp. 130–142 (in Russ.).
9. Denisov M.I., Chekhonin K.A. Protection of personal data in the information system of medical institution method of depersonalization. *Scientific, technical and economic cooperation of Asia Pacific region in the twenty-first century. Khabarovsk: Publishing house of far Eastern State University of Railways*, 2013, vol. 1, pp. 229–232 (in Russ.).
10. Voronin V.V., Nekhai N.L. Personal data protection in information systems by the method of depersonalization. *Information technologies of the XXI century: collection of scientific works. Khabarovsk: Publishing house of Pacific State University*, 2017, pp. 479–483 (in Russ.).
11. Trifonova Yu.V., Zharinov R.F. The possibility of depersonalization of personal data in systems that use relational databases. *Proceedings of TUSUR University. Tomsk: Publishing house Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2014, no. 2 (32), pp. 188–194 (in Russ.).
12. Azhmukhamedov I.M., Demina R.Yu., Safarov I.V. Systematic approach to ensuring the confidentiality of depersonalized personal data in health care institutions // Modern problems of science and education, 2015. – № 1-1 (In Russ.). Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18610/> (accessed: November 16, 2018).
13. Mishchenko E.Yu., Sokolov A.N. Quantitative Analysis of the Depersonalization Procedure. Method of Identifiers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 18–25 (in Russ.).
14. Mishchenko E.Yu., Sokolov A.N. Quantitative analysis of the depersonalization procedure. Method of composition or semantics modification. *UrFR Newsletter. Information Security*, 2016, no. 1 (19), pp. 30–38 (in Russ.).
15. Mishchenko E.Yu., Sokolov A.N. Quantitative analysis of the depersonalization procedure. Method of mixing. *UrFR Newsletter. Information Security*, 2016, no. 3 (21), pp. 30–37 (in Russ.).

---

### Evgeniy Yu. Mishchenko

Senior Lecturer, Department of Information Security,  
South Ural State University (National Research University)  
76, Lenin pr., Chelyabinsk, Russia, 454080  
Phone: +7 (351) 267-93-55  
Email: [mishchenkoei@susu.ru](mailto:mishchenkoei@susu.ru)

### Alexander N. Sokolov

Candidate of Engineering, Assistant Professor,  
Chief of Department of Information Security,  
South Ural State University (National Research University)  
76, Lenin pr., Chelyabinsk, Russia, 454080  
Phone: +7 (351) 267-93-55  
Email: [sokolovan@susu.ru](mailto:sokolovan@susu.ru)

УДК 004.8

А.Т. Нгуен, А.М. Коригов

## Нейронные сети с полиномиальными кусочно-непрерывными функциями активации для поиска закономерностей в данных

Исследовано применение моделей нейронных сетей, использующих полиномиальные кусочно-непрерывные функции активации (ПКНФА) нейронов, для решения задач обнаружения закономерностей в наборах данных. Разработана структура многослойной однонаправленной нейронной сети для четырех видов ПКНФА с использованием метода скользящего окна для прогнозирования временных рядов и определения амплитуды детерминированного полезного сигнала на фоне белого шума. В процессе обучения нейронной сети используется алгоритм Левенберга–Марквардта обратного распространения. По результатам тестирования проведено сравнение четырех нейронных сетей с различными видами ПКНФА с известными сетями. На основе сравнительного анализа разработаны рекомендации по использованию нейронных сетей с ПКНФА для обнаружения закономерностей в наборах данных.

**Ключевые слова:** нечеткие функции активации, нечеткие нейронные сети, обучение нейронных сетей, прогнозирование, определение параметров сигнала, поиск закономерностей в данных.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-71-76

Проблема поиска закономерностей, скрытых в экспериментальных данных, является актуальной для многих разделов науки и техники. Во многих прикладных задачах наборы экспериментальных данных представляют собой последовательности наблюдений (данных), упорядоченные по времени. Такие последовательности обычно называют временными рядами [1]. При анализе временных рядов в основном используются методы математической статистики [1, 2], а в последние годы все шире применяются нейронные сети (см., например, [3]).

В наших работах [4–6] исследуются модели нейронных сетей (НС), использующих импульсные нечеткие функции активации (ФА) нейронов НС. В [4–6] используется четыре вида полиномиальных кусочно-непрерывных функций активации (ПКНФА). Цитируемые работы доступны практически всем читателям нашего журнала, поэтому далее ограни-

чимся только представлением внешнего вида этих ПКНФА на рис. 1.

Особенности построения ПКНФА, представленных на рис. 1, их настройка и применение изложены в [4–6]. Модель нейронной сети, использующую полиномиальную кусочно-непрерывную функцию активации, представленную на рис. 1, *a*, обозначим для краткости через НС-*a*. Соответственно через НС-*б*, НС-*в*, НС-*г* обозначим НС, использующие ПКНФА, представленные на рис. 1, *б–г*.

Исследуем эффективность решения задачи поиска закономерностей, скрытых во временных рядах, на основе новых моделей нейронных сетей НС-*a*, НС-*б*, НС-*в*, НС-*г*. Для сравнительного анализа эффективности НС используем модель НС с известной (сигмоидной) ФА. Данную пятую модель НС обозначим как НС-*сигм*.

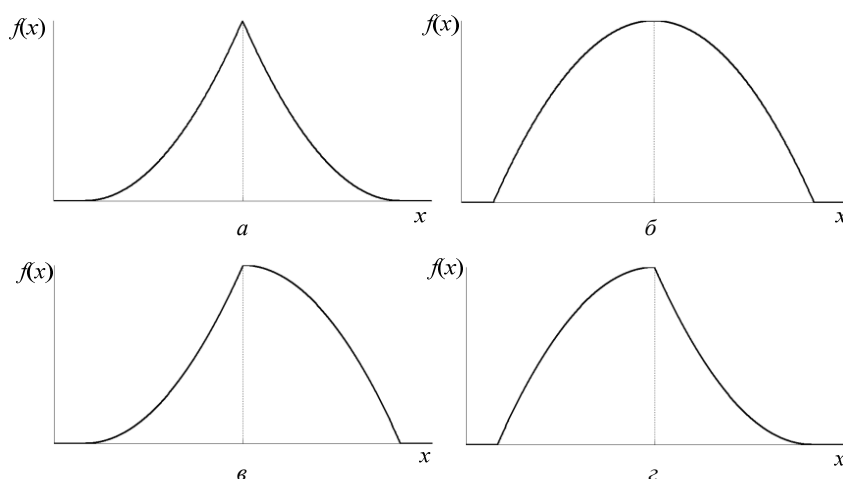


Рис. 1. Внешний вид ПКНФА

### Модели нейронной сети на основе скользящего окна для прогнозирования временных рядов

Метод скользящего окна широко применяется для прогнозирования временных рядов [7, 8]. Размер

окна и сегмента увеличивается до достижения наименьшей погрешности [7]. После выбора первого сегмента следующий сегмент выбирается [8] с конца первого сегмента. Процесс повторяется до тех пор, пока все данные временных рядов не будут сегмен-



тированы. Начальный размер скользящего окна выбирается опытным путем, а затем определяется по набору данных. Структура многослойной однона-

правленной сети (МОНС) состоит из входного слоя, одного скрытого слоя, выходного слоя и представлена на рис. 2.

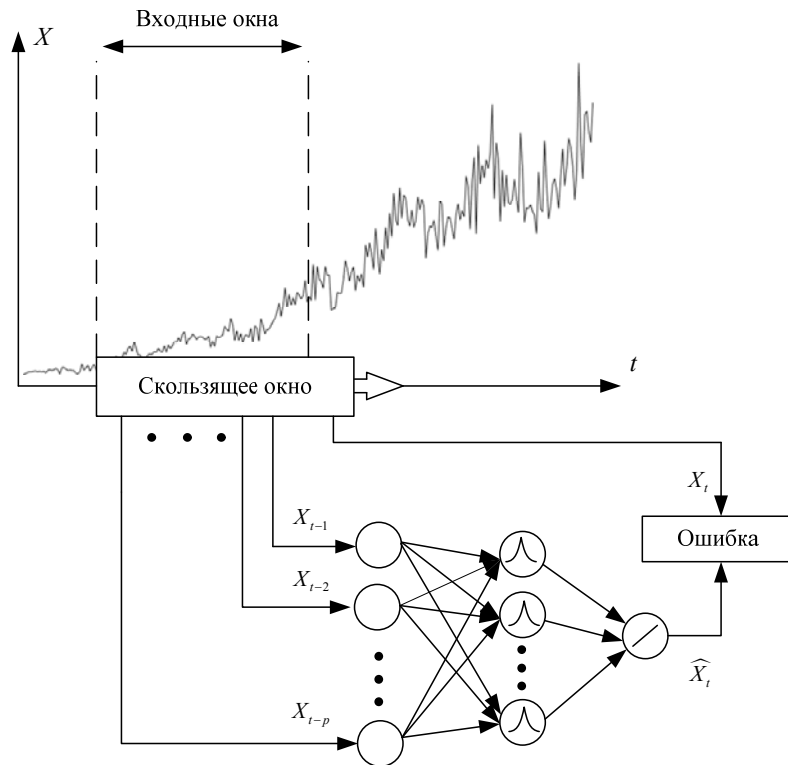


Рис. 2. МОНС для реализации метода скользящего окна

Математическая модель МОНС может быть представлена в следующем виде:

$$\hat{X}_t = w_0 + \sum_{j=1}^Q w_j \cdot f \left( w_{0j} + \sum_{i=1}^P w_{i,j} \cdot X_{t-i} \right), \quad (1)$$

где  $P$  и  $Q$  – количество входных и скрытых нейронов соответственно,  $w_j, j=0, 1, \dots, Q$  – элементы весовых векторов  $\mathbf{w}$  от скрытого слоя до выхода,  $w_{i,j}, i=1, 2, \dots, P$  &  $j=1, 2, \dots, Q$  – элементы весовых векторов  $\mathbf{w}$  от входа к скрытым нейронам. Для согласованности сети и сокращения времени вычисления входные данные нормализуются до начала обработки:

$$X_{\text{норм}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}.$$

В наборе данных 70% данных используется для обучения НС и 30% – для тестирования. Для обучения выбран алгоритм Левенберга–Марквардта обратного распространения (ЛМОР) [9]. Обновление весовых векторов  $\mathbf{w}$  выполняется по формуле [10]:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k - (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{e}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{W}$  – обобщенный весовой вектор, содержащий элементы всех весовых векторов  $\mathbf{w}$ ;  $\mathbf{I}$  – единичная матрица;  $\mu$  – параметр шага обучения, значение которого уменьшается после каждого успешного шага;  $\mathbf{J}$  – матрица Якобиана, содержащая первые

производные сетевых ошибок относительно весов;  $\mathbf{e}$  – вектор сетевых ошибок во всех образцах обучения. Для оценки матрицы Якобиана используется стандартный алгоритм обратного распространения для аппроксимации матрицы Гессияна [11]. В алгоритме (2) при вычислении матрицы Якобиана используется среднеквадратичная ошибка (СКО)  $\delta$  для сетевого обучения:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}_i - Z_i)^2}{n}, \quad (3)$$

где  $Z_i$  обозначает  $i$ -е значение из выборки данных;  $\hat{Z}_i$  – оценка, полученная сетью для значения  $Z_i$ ;  $n$  – количество выборок данных для сетевого обучения.

На основе МОНС, представленной на рис. 2, созданы пять моделей НС: четыре модели НС (НС-а, НС-б, НС-в, НС-г) с ПКНФА и модель НС с сигмоидной ФА – НС-сигм.

#### Модели данных

Исследуется последовательность случайных величин (случайный процесс) на некотором интервале времени  $T$ . Значение процесса  $z_t$  в каждый момент времени  $t$  является случайной величиной. Такие процессы называются временными рядами. Модель временного ряда можно представить последовательностью наблюдений:

$$z_t = y_t + \varepsilon_t, \tag{4}$$

где  $y_t$  – регулярная (систематическая) составляющая исследуемого временного ряда,  $\varepsilon_t$  – аддитивная случайная помеха. В свою очередь в модели (4) регулярную составляющую можно представить различными моделями сигналов: вероятностный (стохастический) полезный сигнал (тренд курса обмена валют на финансовых рынках и др.), детерминированный полезный сигнал (сигналы в радиотехнике, радионавигации, связи и т.п.). Условно назовем модель (4) со стохастическим полезным сигналом –

первая модель данных, а модель (4) с детерминированным полезным сигналом – вторая модель данных.

Временные ряды, соответствующие первой модели данных, представлены на рис. 3. На этом рисунке представлено три набора данных (три временных ряда): набор данных 1 – ежемесячный австралийский импорт из Японии от июля 1965 г. до октября 1993 г. [12], набор данных 2 – обменный курс австралийского доллара за 1 доллар США от июля 1969 г. до августа 1995 г. [13] и набор данных 3 – экспорт кварталных австралийских национальных счетов от сентября 1959 г. до июня 1995 г. [14].

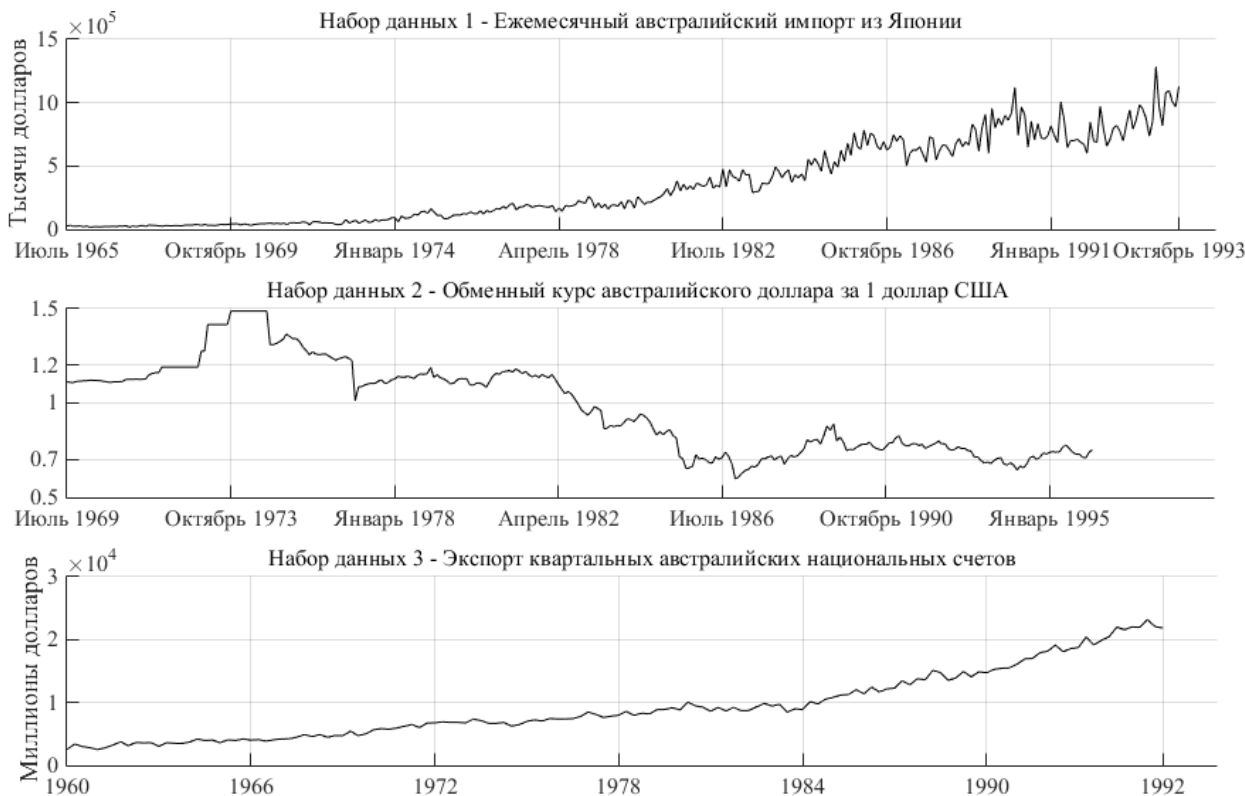


Рис. 3. Наборы данных (первая модель)

В качестве второй модели данных используем аддитивную смесь полезного сигнала  $y$  и белого шума  $\varepsilon$ . Детерминированный полезный сигнал представим в виде синусоиды:

$$y = x \times \sin(2\pi ft), \tag{5}$$

где  $x$  – амплитуда полезного сигнала;  $f$  – частота полезного сигнала. Белый шум  $\varepsilon$  имеет нормальный закон распределения  $N(0, \sigma^2)$ , т.е. имеет нулевое математическое ожидание и дисперсию  $\sigma^2$ .

**Моделирование нейронных сетей**

Для каждого набора данных проведено по 5 экспериментов, в которых последовательно исполь-

зуется пять моделей НС: модель НС с сигмоидной ФА – НС-*сигм* и четыре модели НС (НС-*а*, НС-*б*, НС-*в*, НС-*г*) с новыми ПКНФА. В этих экспериментах используются одинаковые структуры для каждого набора данных, т.е. для каждого набора данных структуры НС имеют одинаковое количество нейронов (10 нейронов) в скрытом слое, размеры скользящего окна также не отличаются.

В табл. 1 приведены СКО, вычисленные по формуле (3), для определения лучшей модели НС для прогнозирования временных рядов с первой моделью данных.

Таблица 1

СКО для результатов экспериментов с первой моделью данных

Данные	Тип НС				
	НС- <i>сигм</i>	НС- <i>а</i>	НС- <i>б</i>	НС- <i>в</i>	НС- <i>г</i>
Набор данных 1	$23 \times 10^{-4}$	$25 \times 10^{-4}$	$25 \times 10^{-4}$	$23 \times 10^{-4}$	$24 \times 10^{-4}$
Набор данных 2	$18 \times 10^{-4}$	$17 \times 10^{-4}$	$16 \times 10^{-4}$	$16 \times 10^{-4}$	$21 \times 10^{-4}$
Набор данных 3	$2,74 \times 10^{-4}$	$7,01 \times 10^{-4}$	$2,33 \times 10^{-4}$	$2,89 \times 10^{-4}$	$4,38 \times 10^{-4}$

Из результатов тестирования НС следует, что разрабатываемые нами модели нечетких нейронов и нечетких НС второго типа [4–6] вполне успешно решают задачи прогнозирования временных рядов со стохастическим полезным сигналом (первая модель данных). СКО для прогнозируемых данных в НС с ПКНФА вида  $a$ ,  $b$ ,  $v$ ,  $z$  (см. рис. 1) незначительно отличаются от СКО для прогнозируемых данных в обычной НС (НС-сигм). Эксперименты показывают, что модель НС с ФА вида  $b$  (НС- $b$ ) наиболее эффективна. Модели нейронной сети с ФА вида  $v$  (НС- $v$ ) также показывают хорошие результаты, но они незначительно отличаются от обычной НС. В наборах данных на рис. 3 нечеткие НС прогнозируют тренды, которые можно интерпретировать как вероятностные (стохастические) полезные сигналы на фоне случайных помех. Разрабатываемые нечеткие НС второго типа (особенно НС- $b$  с ФА вида  $b$ ) эффективно решают подобные задачи.

В экспериментах со второй моделью данных (5) выбираем амплитуды из интервала (1; 1,5); дискретное время  $t$  – это 500 эквидистантных значений от 0 до 0,5 с; задаем  $f = 60$  Гц. Затем добавляем гауссовский белый шум (отношение сигнал/шум = 0,05). Отношение сигнал/шум – безразмерная величина, равная отношению мощности полезного сигнала к мощности шума [15. С. 51]. Чем больше это отношение, тем меньше шум влияет на характеристики сигнала. Таким образом, на вход НС поступает временной ряд, представляющий собой упорядоченную последовательность значений, характер которой меняется во времени  $t$ . Задачей НС является прогноз значения  $x$  – амплитуды полезного сигнала на входе НС. Подобные задачи возникают во многих приложениях НС. На рис. 4 показан чистый оригинальный сигнал – синусоида (5) с амплитудой 1,5 и этот же сигнал после добавления к нему гауссовского белого шума с отношением сигнал/шум = 0,05.

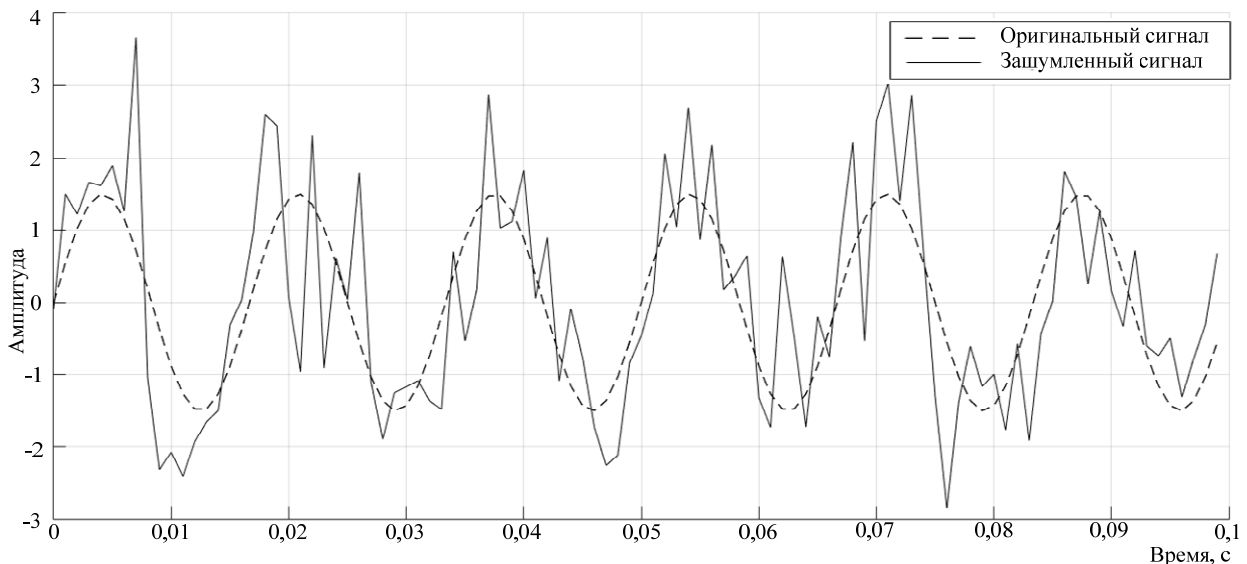


Рис. 4. Сигнал для экспериментов со второй моделью данных

Для тестирования НС со второй моделью данных выбираем 5 значений амплитуды в интервале от 1,1 до 1,5 и для каждого значения амплитуды создаем 20 зашумленных сигналов. Так же, как и с первой моделью данных, проводится 5 экспериментов,

в которых используется обычная НС с сигмоидной ФА для определения значения амплитуды. В табл. 2 приведены СКО, вычисленные по формуле (3), по выбору лучшей модели НС для определения амплитуды полезного сигнала на фоне белого шума.

Таблица 2

СКО для результатов экспериментов со второй моделью данных

Тип НС	Амплитуда сигнала				
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
НС- $a$	$230 \times 10^{-4}$	$43 \times 10^{-4}$	$230 \times 10^{-4}$	$53 \times 10^{-4}$	$157 \times 10^{-4}$
НС- $b$	$129 \times 10^{-4}$	$28 \times 10^{-4}$	$41 \times 10^{-4}$	$82 \times 10^{-4}$	$339 \times 10^{-4}$
НС- $v$	$88 \times 10^{-4}$	$16 \times 10^{-4}$	$4,96 \times 10^{-4}$	$1,93 \times 10^{-4}$	$4,23 \times 10^{-4}$
НС- $z$	$164 \times 10^{-4}$	$25 \times 10^{-4}$	$2,10 \times 10^{-4}$	$100 \times 10^{-4}$	$217 \times 10^{-4}$
НС-сигм	$278 \times 10^{-4}$	$74 \times 10^{-4}$	$34 \times 10^{-4}$	$63 \times 10^{-4}$	$315 \times 10^{-4}$

Из результатов тестирования НС следует, что разрабатываемые нами модели нечетких нейронов и нечетких НС второго типа вполне успешно решают задачу определения амплитуды детерминированного полезного сигнала на фоне белого шума. СКО в НС

с ФА вида  $a$ ,  $b$ ,  $v$ ,  $z$  (см. рис. 1) в большинстве экспериментов показывают более высокую точность определения параметра детерминированного полезного сигнала. Эксперименты показывают, что модель НС с ФА вида  $v$  (НС- $v$ ) наиболее эффективна. Моде-

ли нейронной сети с ФА вида  $a$ ,  $b$ ,  $c$  также показывают хорошие результаты, но они незначительно отличаются от НС-*сигм*.

### Заключение

1. Разработана структура НС с использованием метода скользящего окна для прогноза временных рядов с ФА вида  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (см. рис. 1). Процесс обучения реализуется с помощью алгоритма Левенберга–Марквардта обратного распространения. Для обучения и тестирования НС используются реальные наборы данных и модели в виде аддитивной смеси детерминированного полезного сигнала и белого шума.

2. Среднеквадратичная ошибка (СКО) используется для определения лучшей модели НС. В экспериментах с прогнозированием реальных временных рядов (см. рис. 3), СКО НС с ФА вида  $a$ ,  $b$ ,  $c$  незначительно отличаются от СКО обычной НС. Эксперименты показывают, что модель НС с ФА вида  $b$ ,  $c$  (см. рис. 1) наиболее эффективны. Тем не менее тестирование разработанных НС на смеси синусоидальных сигналов и гауссовского белого шума с отношением сигнал/шум = 0,05 и их сравнительный анализ с известной НС (ФА-*сигмоид*) показали более лучшие результаты по эффективности и точности определения параметра детерминированного полезного сигнала, особенно НС- $b$  (НС с ФА вида  $b$ ).

### Литература

- Андерсон Т.В. Статистический анализ временных рядов. – М.: Мир, 1976. – 757с.
- Обнаружение закономерностей в массивах экспериментальных данных / Н.Г. Загоруйко, И.А. Борисова, О.А. Кутненко, Д.А. Леванов // Вычислительные технологии. – 2013. – Т.18, спец. вып. – С. 12–20.
- Ефремова Е.А. Алгоритм выбора даты размещения субфедерального облигационного займа на основе аппарата нейронных сетей / Е.А. Ефремова // Доклады ТУСУР. – 2009. – № 1(19), ч. 1. – С. 144–149.
- Nguyen A.T. Neural network model with fuzzy activation functions for time series predictions / A.T. Nguyen, A.M. Korikov // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 50–52.
- Кориков А.М. Нейро-нечеткая классификация объектов и их состояний / А.М. Кориков, А.Т. Нгуен // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 73–86.
- Nguyen A.T. Models of neural networks with fuzzy activation functions / A.T. Nguyen, A.M. Korikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012031> (дата обращения: 01.03.2018).
- Mozaffari L. Vehicle speed prediction via a sliding-window time series analysis and an evolutionary least learning machine: A case study on San Francisco urban roads / L. Mozaffari, A. Moxaffari, N.L. Azad // Engineering Science and Technology, An International Journal. – 2015. – Vol. 18. – P. 150–162.
- Vafaeipour M. Application of sliding window technique for prediction of wind velocity time series / M. Vafaeipour, O. Rahbari, M.A. Rosen, F. Fazelpour, P. Ansarirad // International Journal of Energy and Environmental Engineering (Springer). – 2014. – Vol. 5. – P. 105–111.

9. Levenberg-Marquardt backpropagation training of multilayer neural networks for state estimation of a safety critical cyber-physical system / L.V. Chen, Yan Xing, Junzhi Zhang et al. // IEEE Transactions On Industrial Informatics. – 2018. – Vol. 14, No. 8. – P. 3436–3446.

10. Nguyen A.T. Application of Artificial Neural Networks to Predict Dynamic Responses of Wing Structures due to Atmospheric Turbulence / A.T. Nguyen, J.H. Han, A.T. Nguyen // International Journal of Aeronautical and Space Sciences. – 2017. – Vol. 18 (3). – P. 474–484.

11. Hagan M.T. Training feed forward networks with the Marquardt algorithm / M.T. Hagan, M.B. Menhaj // IEEE Trans. Neural Netw. – 1994. – Vol. 5. – P. 989–993.

12. Monthly Australian imports from Japan: thousands of dollars. Jul 65 – Oct 93. – URL: <https://datamarket.com/data/set/22qx/monthly-australian-imports-from-japan-thousands-of-dollars-jul-65-oct-93#!ds=22qx&display=line> (дата обращения 01.03.2018).

13. Exchange rate of Australian dollar: \$A for 1 US dollar. Monthly average: Jul 1969 – Aug 1995. – URL: <https://datamarket.com/data/set/22wv/exchange-rate-of-australian-dollar-a-for-1-us-dollar-monthly-average-jul-1969-aug-1995#!ds=22wv&display=line> (дата обращения: 01.03.2018).

14. Quarterly Australian national accounts exports: millions of dollars at 1989/90 prices. Sep. 59 – Jun. 95. – URL: <https://datamarket.com/data/set/22my/quarterly-australian-national-accounts-exports-millions-of-dollars-at-198990-prices-sep-59-jun-95#!ds=22my&display=line> (дата обращения: 01.03.2018).

15. Хоровиц П. Искусство схемотехники: в 3 т. – Т. 2. Пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1993. – 371 с.

### Нгуен Ань Ту

Аспирант отд. автоматизации и робототехники  
Национального исследовательского  
Томского политехнического университета (НИ ТПУ)  
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-952-157-48-78  
Эл. почта: [nguyenanhtu@tpu.ru](mailto:nguyenanhtu@tpu.ru)

### Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. АСУ ТУСУРа,  
вед. науч. сотр. Томского ф-ла  
Института вычислительных технологий СО РАН  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-42-79  
Эл. почта: [korikov@asu.tusur.ru](mailto:korikov@asu.tusur.ru)

Nguyen A.T., Korikov A.M.

### Neural networks with polynomial piecewise-continuous activation functions for the problems of finding data patterns

This paper investigates the application of neural network models using polynomial piecewise-continuous activation function (PPCAF) to solve the problems of finding patterns in data sets. The authors apply multi-layered feed forward neural networks (NNs) with four types of PPCAF and use the sliding window method to predict a time series and determine the amplitude of a given signal on the white noise background. The training process of the multi-layered feed forward NN is conducted with the Levenberg-Marquardt back-propagation

algorithm. From the testing results, a comparison is made between a known multi-layered feed forward NN and four multi-layered feed forward NNs using various types of PPCAF. Based on the result of the comparison analysis, recommendation is made for the use of multi-layered feed forward NNs with PPCAF for the problems of finding patterns in data sets.

**Keywords:** fuzzy activation functions, fuzzy neural networks, neural network training, prediction, determining signal parameters, finding data patterns.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-71-76

### References

1. Anderson T.W. The statistical analysis of time series. Publ: Mir, 1976. – 757p.

2. Zagoruiko N.G., Borisova I.A., Kutnenko O.A., Levyanov D.A. Obnaruzhenie zakonornostei v massivakh eksperimentalnykh dannikh [Detection of patterns in experimental data arrays]. *Computational Technologies*, 2013, vol. 18, Special ed., pp. 12–20 (in Russ.).

3. Efremova E.A. Algoritm vibora dati razmeshenya subfederalnogo obligtsionnogo zaima na osnove apparata neironnykh setei [The algorithm choice date of bonded loan placing by using neural networks mathematical apparatus]. *Proceedings of TUSUR University*, 2009, vol. 19, no. 1, pp. 144–149 (in Russ.).

4. Melnik I.A., Erofeev L.Ya. Physical and geochemical model of low resistivity reservoir and its practical application. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2014, no. 3, pp. 46–50 (in Russ.).

5. Korikov A.M., Nguyen A.T. Neuro-nechetkaya klassifikatsiya ob'ektov i ikh sostoyanii [A neuro-fuzzy classification of objects and their states]. *Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2018, vol. 72, no. 3, pp. 73–86 (in Russ.).

6. Nguyen A.T., Korikov A.M. Models of neural networks with fuzzy activation functions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012031> (accessed: March 01, 2018).

7. Mozaffari L. Vehicle speed prediction via a sliding-window time series analysis and an evolutionary least learning machine: A case study on San Francisco urban roads. *Engineering Science and Technology, An International Journal*, 2015, vol. 18, pp. 150–162.

8. Vafaiepour M., Rahbari O., Rosoen M.A., Fazelpour F., Ansarirad P. Application of sliding window technique for prediction of wind velocity time series. *International Journal of Energy and Environmental Engineering (Springer)*, 2014, vol. 5, pp. 105–111.

9. Chen L.V., Yan Xing, Junzhi Zhang et al. Levenberg-Marquardt backpropagation training of multilayer neural networks for state estimation of a safety critical cyber-physical system. *IEEE Transactions On Industrial Informatics*, 2018, vol. 14, no. 8, pp. 3436–3446.

10. Nguyen A.T., Han J.H., Nguyen A.T. Application of Artificial Neural Networks to Predict Dynamic Responses of Wing Structures due to Atmospheric Turbulence. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 474–484.

11. Hagan M.T., Menhaj M.B. Training feed forward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Trans. Neural Netw.*, 1994, vol. 5, pp. 989–993.

12. Monthly Australian imports from Japan: thousands of dollars. Jul 65 – Oct 93. Available at: <https://datamarket.com/data/set/22qx/monthly-australian-imports-from-japan-thousands-of-dollars-jul-65-oct-93#!ds=22qx&display=line> (accessed: 01 March 2018).

13. Exchange rate of Australian dollar: \$A for 1 US dollar. Monthly average: Jul 1969 – Aug 1995. Available at: <https://datamarket.com/data/set/22wv/exchangerate-of-australian-dollar-a-for-1-us-dollar-monthly-average-jul-1969-aug-1995#!ds=22wv&display=line> (accessed: 01 March 2018).

14. Quarterly Australian national accounts exports: millions of dollars at 1989/90 prices. Sep 59 – Jun 95. Available at: <https://datamarket.com/data/set/22my/quarterly-australian-national-accounts-exports-millions-of-dollars-at-198990-prices-sep-59-jun-95#!ds=22my&display=line> (accessed: March 01, 2018).

15. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. M.: Mir, 1993, vol. 3, 371 p.

---

### Anh T. Nguyen

PhD student, Department of Automation and Robotics, Tomsk Polytechnic University  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-157-48-78  
Email: [nguyenanhtu@tpu.ru](mailto:nguyenanhtu@tpu.ru)

### Anatoly M. Korikov

Doctor of Engineering, Professor,  
Head of the Department of Automated Control Systems  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050;  
Leading researcher at Tomsk Branch of the Institute  
of Computing Technologies SB RAS  
Phone: +7 (382-2) 41-42-79  
Email: [korikov@asu.tusur.ru](mailto:korikov@asu.tusur.ru)

УДК 303.732.4

Ю.П. Ехлаков

## Шаблоны бизнес-требований и требований пользователей к программному обеспечению производственно-технологического типа

Предложен подход к разработке шаблонов бизнес-требований и требований пользователей к программному продукту, основанный на использовании содержательных моделей системного анализа. Представлены содержательные модели декомпозиции элементов жизненного цикла: бизнес-процессов материального производства конечного продукта, информационной поддержки управления бизнес-процессами, обработки информации при информационной поддержке управления бизнес-процессами; содержательные модели декомпозиции элементов состава экономических показателей: ресурсов, результативности, качества, эффективности управления производством. Описаны элементы языка проектирования шаблонов, приведены варианты шаблонов описания: проблем, бизнес-требований, пользовательских и функциональных требований. В качестве примера приведены шаблоны требований к информационной системе поддержки управления бизнес-процессами распределительного центра.

**Ключевые слова:** системный анализ, модели декомпозиции, жизненный цикл, бизнес-процессы, шаблоны проектирования требований.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-77-82

В настоящее время разработка и продвижение на рынок прикладных программных продуктов (ПП) реализуются по двум бизнес-моделям: разработка рыночного (тиражного) программного продукта или разработка уникального ПП «под заказ» для решения конкретных проблем, возникающих в системах управления производством. При создании тиражного ПП велика вероятность разработать продукт невостребованный на рынке, возможны ошибки при выборе целевых сегментов, каналов и инструментов маркетинговых коммуникаций. При использовании заказной модели разработки ПП основные проблемы связаны с тем, насколько точно и корректно разработчики смогли выделить потребности всех заинтересованных лиц, сформулировать и согласовать их в виде требований, которые в свою очередь определяют состав и содержание моделей бизнес-процессов производства конечных продуктов и/или услуг компании [1, 2].

В общем случае в литературе требования определяются как условия или возможности, которыми должна обладать программная система или ее отдельные компоненты для решения конкретных проблем потенциальных пользователей, сформулированные в виде целей, задач и функционала будущего ПП, которые должны быть надлежащим образом представлены и оформлены в виде технического задания или иного документа. Виды, типы и методы выявления и анализа требований достаточно подробно описаны в технической литературе [3–5].

Для стандартизации и унификации процессов разработки и управления требованиями широко используются шаблоны проектирования. В отечественной литературе достаточно подробно описаны шаблоны для разработки функциональных, нефункциональных и системных требований [3–7], основанные на использовании стандартов на жизненный цикл и качество разработки программных продуктов

[8–10], и отсутствуют какие-либо формализованные варианты шаблонов по выявлению бизнес-требований и требований пользователей.

Основным источником выявления бизнес-требований и требований пользователей являются сведения, основанные на диалоге разработчиков ПП с потенциальными потребителями, а также пользовательские мнения о программных продуктах, размещенных в сети Интернет. Для выявления требований используются, как правило, следующие эвристические процедуры: метод мозгового штурма, метод Делфи, метод разработки сценариев, метод морфологического анализа (интервьюирование, наблюдение, анкетирование, проведение совместных семинаров). При таком подходе велика зависимость результатов от уровня квалификации сторон, от того, каким языком описано требование, насколько оно четко и точно отражает потребности пользователей. Последнее часто приводит к тому, что требования бывают сложными, противоречивыми, плохо структурированными, дублирующимися, слабо связанными с запросами и потребностями заинтересованных сторон, отражают нереалистичные ожидания пользователей, часто изменяются или изменяются без необходимости [3]. Эти проблемы остро стояли и перед коллективом разработчиков, возглавляемых автором при создании и продвижении на рынок ряда программных продуктов [11].

В данной статье для устранения отмеченных недостатков предлагается формализованная процедура описания шаблонов бизнес-требований и требований пользователей, основанная на использовании содержательных моделей декомпозиции, предложенных томской школой системного анализа [12].

### Содержательные модели декомпозиции требований к программному продукту

Для дальнейшего изложения материала введем следующие определения. Декомпозиция – процедура

разбиения сложного понятия на составляющие его элементы (разбиение целого на части). Модель декомпозиции – набор формальных элементов, обеспечивающих однозначное разбиение целого на части. В данном случае в качестве сложных понятий будем рассматривать бизнес-требования и требования пользователей, а в качестве моделей декомпозиции – модель «жизненного цикла» и модель «состава». Под моделью «жизненного цикла» будем понимать строго упорядоченную совокупность элементов, описывающих эволюционное преобразование исходных ресурсов в конечные результаты системы, под моделью «состава» – набор формальных элементов системы [13].

Внутреннее содержание каждой модели определяется соответствующим классификатором, элементы которого однозначно определяют сущности элементов понятия. «Глубина» декомпозиции определяется размерностью используемого классификатора и предполагает декомпозицию до получения простого, понятного, заведомо выполнимого результата. Например, при декомпозиции бизнес-процесса получения конечных продуктов производственной системы в качестве модели декомпозиции «жизненный цикл» можно использовать классификатор, состоящий из трех элементов: <снабжение, производство, реализация>, либо более подробный, состоящий из семи элементов: <определение потребности в продукции, закупка сырья, хранение сырья, производство продуктов, контроль качества производства продуктов, хранение готовых продуктов, реализация> [13]. С учетом вышеизложенного для описания шаблонов бизнес-требований и требования пользователей будем использовать следующие модели «жизненного цикла» и «состава».

Модели декомпозиции элементов «жизненного цикла»:

– бизнес-процессов основного производства материальных конечных продуктов компании: «маркетинг, снабжение, производство, реализация»;

– информационной поддержки управления бизнес-процессами: «прогнозирование, планирование, мониторинг, учет, контроль, анализ, регулирование»;

– обработки информации при информационной поддержке управления бизнес-процессами: «регистрация, сбор, передача, обработка, хранение, защита, архивирование, уничтожение».

Модели декомпозиции элементов «состава» производственно-экономических показателей производства материальных конечных продуктов:

– результативности производства: «доходы от основных видов деятельности, доля рынка, емкость рынка, выручка, объем продаж, прибыль»;

– ресурсных показателей производства: «основные средства, оборотные средства»;

– качества управления производством в целом и отдельными бизнес-процессами: «затраты на производство и реализацию продукции по статьям калькуляции, производственные расходы, общепроизводственные расходы (накладные расходы), себестоимость, загрузка оборудования, межоперационные запасы сырья и комплектующих, потери от брака»;

– эффективности управления производством: «рентабельность реализованной продукции, рентабельность использования основных средств (фондоотдача), рентабельность оборачиваемости активов».

Модели «состава» показателей программного продукта:

– оценки качества программного продукта: «функциональная пригодность, надежность, эффективность, переносимость, применяемость, сопровождаемость»;

– оценки качества обработки информации: «полнота, достоверность, глубина ретроспективы, оперативность, актуальность, защищенность»;

– архитектуры программного продукта «программный продукт, программный комплекс, программа».

Варианты использования моделей для разработки шаблонов бизнес-требований и требований пользователей представлены в таблице.

Очевидно, что состав классификаторов в каждой из представленных моделей может уточняться в зависимости от предметной области и мнений участников процесса разработки требований.

**Варианты использования моделей для разработки шаблонов требований к программному продукту**

Модели	Шаблоны			
	Бизнес-требования	Требования пользователей	Функциональные требования	Нефункциональные требования
ЖЦ бизнес-процессов производства	+	+	+	
ЖЦ управления бизнес-процессами	+	+	+	
ЖЦ обработки информации		+	+	
Состав показателей результативности	+	+		
Состав показателей качества управления	+	+		
Состав показателей эффективности управления	+			
Состав показателей ресурсов	+	+		
Состав показателей качества ИП				+
Состав архитектуры ИП		+	+	+
Состав показателей БД				+

### Шаблоны описания требований

Одной из первых работ описания шаблонов как средства разработки и проектирования является монография, в которой изложена концепция языка

шаблонов как «структурированного подхода к описанию эффективных методов проектирования в контексте накопленного опыта» [14]. В данном случае в основу языка разработки шаблонов требований по-

ложена совокупность классификаторов моделей, характеристик ее атрибутов, а также семантических единиц (слов, фраз), используемых для описания шаблона. Структура шаблона состоит из декларативного и атрибутивного описания, это позволяет разделить «тело» шаблона на две части: структуру и атрибуты. Для формализованного описания элементов структуры шаблонов вводятся следующие метасимволы: модели и их атрибуты – [квадратные скобки]; характеристики атрибутов – <треугольные скобки>, семантические единицы предлагается выделять жирным шрифтом. Характеристики атрибутов модели определяют качественные или количественные показатели свойств: «низкий – средний – высокий уровень», «до ?? процентов, в ?? раза». Для описания семантических единиц, характеризующих шаблоны выявления проблем, предлагается использовать следующие лексические конструкции (ключевые фразы): *выделите проблемы на этапе..., связанные с ... уровнем показателей*. Содержание семантических единиц описания шаблонов требований зависит от типа требований: для описания атрибутов моделей бизнес-требований – *повысить, снизить, сократить, увеличить и т.д.*; для описания атрибутов моделей требований пользователей – *должен иметь возможность*; для описания атрибутов моделей функциональных требований – *должен(на) обеспечить*. С учетом вышеизложенного шаблон описания требования задается структурированной последовательностью различных комбинаций лексических конструкций, сгруппированных в зависимости от вида требований.

Состав и содержание бизнес-требований должны определяться исходя из выявленных проблем в управлении бизнес-процессами. Определим проблему как степень несоответствия: между желаемым и действительным состоянием бизнес-процессов; между потребностями и возможностями пользователей при управлении бизнесом. Явная и четкая формулировка проблем позволит разработчику реализовать только необходимый функционал, обеспечивающий информационную поддержку управления бизнес-процессами. При этом следует выделять как проблемы компании, возникающие при ее взаимодействии с внешними структурами (территориальными и федеральными органами власти и управления, потребителями, поставщиками, партнерами, конкурентами), так и проблемы, связанные с неэффективной организацией управления бизнес-процессами по производству конечного продукта и/или оказанию услуги. Участниками процесса выявления и анализа проблем являются руководители компании, системный аналитик. Ниже приведены некоторые варианты шаблонов вопросов при интервьюировании или анкетировании руководителей компании и шаблонов выявления и описания проблем.

*Шаблоны выявления проблем:*

– **выделите проблемы на этапе** [маркетинг – снабжение – транспортировка – производство – реализация], связанные «с низким – высоким» **уровнем**

**показателей** [результативность – ресурсы – эффективность – качество управления];

– **выделите проблемы, связанные** «с низкими» уровнем **качества** [прогнозирование, планирование, мониторинг, учет, контроль, анализ, регулирование] **на этапе** [маркетинг – снабжение – транспортировка – производство – реализация].

*Шаблоны описания проблем:*

– «низкий – высокий» **уровень показателей** [результативность – ресурсы – эффективность – качество управления] **на этапе** [маркетинг – снабжение – транспортировка – производство – реализация];

– «низкий» **уровень качества** [прогнозирование, планирование, мониторинг, учет, контроль, анализ, регулирование] **на этапе** [маркетинг – снабжение – транспортировка – производство – реализация].

При анализе и описании выявленного множества проблем необходимо четко сформулировать сущность проблемы и описать ситуацию, при которой проблема имеет место. Состав и содержание бизнес-требований должны определяться исходя из выявленных проблем в управлении бизнес-процессами производства конечных продуктов. Реализация бизнес-требований в составе ПП должна обеспечить достижение конкретных целей (результатов), которые руководство собирается получить от использования программного продукта. Формулировка целей может выражаться как в качественной, так и в количественной форме, должна быть четкой и компактной, носить повелительный характер (снизить, повысить, сократить, увеличить, обеспечить и т.д.). Участниками процесса выявления и анализа бизнес-требований также являются руководители компании и системный аналитик. Ниже приведены некоторые варианты *шаблонов описания бизнес-требований*:

– «повысить, снизить, сократить, увеличить» **уровень показателей** [результативность – ресурсы – эффективность – качество управления] **на этапе** [маркетинг – снабжение – транспортировка – производство – реализация];

– «повысить, снизить, сократить, увеличить» **уровень показателей** [результативность – ресурсы – эффективность – качество управления] **на этапе** [маркетинг – снабжение – транспортировка – производство – реализация] «на до [число] процентов»;

– «повысить, увеличить» **уровень качества** [прогнозирование, планирование, мониторинг, учет, контроль, анализ, регулирование] **на этапе** [маркетинг – снабжение – транспортировка – производство – реализация].

Пользовательские требования должны быть ориентированы на выполнение бизнес-требований и описывать задачи (возможности), которые программный комплекс позволит решить пользователям в рамках своих служебных обязанностей (должностных инструкций). Участники: сотрудники компании (потенциальные пользователи ИТ, архитектор ИТ, системный аналитик). Варианты представления *шаблонов пользовательских требований* выглядят следующим образом:



– [тип пользователя] **должен иметь возможность решать задачи** [прогнозирование, планирование, мониторинг, учет, контроль, анализ, регулирование] **на этапе** [маркетинг – снабжение – транспортировка – производство – реализация];

– [тип пользователя] **должен обеспечить возможность** [регистрация, сбор, передача, обработка, хранение, защита, архивирование, уничтожение] **информацию при решении задач** [прогнозирование, планирование, мониторинг, учет, контроль, анализ, регулирование] **на этапе** [маркетинг – снабжение – транспортировка – производство – реализация].

Структуризация требований пользователей осуществляется при помощи функциональных требований к системе, которые определяют функциональные возможности программного обеспечения, методы передачи и преобразования входных данных в результаты, которые разработчики должны реализовать, чтобы выполнить бизнес-требования и требования пользователей. Участники: сотрудники компании, архитектор ИТ.

Вариант представления *шаблона функциональных требований*:

– [система, подсистема, программный комплекс, программа] должен(на) обеспечить [регистрация, сбор, передача, обработка, хранение, защита, архивирование, уничтожение] информацию при решении задач [прогнозирование, планирование, мониторинг, учет, контроль, анализ, регулирование] на этапе [маркетинг – снабжение – транспортировка – производство – реализация].

С учетом вышеизложенного процесс разработки требований можно представить в виде следующей последовательности этапов: определение состава системных моделей и их атрибутивного описания; разработка шаблонов выявления и описания проблем; выявление, описание и согласование перечня проблем; разработка шаблонов описания бизнес-требований; разработка бизнес-требований; разработка шаблонов описания требований пользователей; разработка пользовательских требований; разработка шаблонов описания функциональных требований; разработка функциональных требований; формирование и согласование требований к ПП. Описанная последовательность этапов положена в основу разработки рекомендательной системы информационной поддержки деятельности системных аналитиков и архитекторов программного обеспечения.

Ниже приводятся результаты апробации описанного подхода при разработке требований к информационной системе поддержки управления бизнес-процессами распределительного центра.

#### **Пример разработки шаблонов требований к информационной системе поддержки управления бизнес-процессами распределительного центра**

Распределительный центр (РЦ) является важным структурным подразделением складского хозяйства крупной промышленной компании и предназначен как для приема, размещения и хранения товаров (готовой продукции, исходного сырья, полу-

фабрикатов), так и для комплектации заказов из полуфабрикатов и продуктов разных категорий для реализации потребителям [15]. Бизнес-процесс приема и размещения товара состоит из следующего набора операций: прием товаров, определение места хранения и размещение товара; учет и контроль наличных запасов на складе. В свою очередь бизнес-процесс комплектации, с учетом особенностей РЦ, представляют в виде следующего набора операций: отбор товара в зону комплектации; комплектация заказов товара для конкретного клиента; доставка в зону отгрузки [16].

На первом этапе системным аналитиком на основе предварительного анализа деятельности РЦ были сформированы следующие содержательные модели: модель жизненного цикла бизнес-процессов РЦ: «снабжение – хранение – реализация»; модель бизнес-процессов «снабжение – хранение»: «прием исходного сырья, полуфабрикатов, готовой продукции – определение мест и размещение на хранение – учет и контроль наличных запасов на складе»; модель бизнес-процесса «реализация»: «отбор товара в зону комплектации – комплектация заказов товара для конкретного потребителя – доставка в зону отгрузки»; модель жизненного цикла информационной поддержки управления РЦ: «планирование, мониторинг, учет, контроль, анализ»; модель жизненного цикла обработки информации при информационной поддержке управления бизнес-процессами: «регистрация, сбор, передача, обработка, хранение, защита, архивирование, уничтожение»; модель состава ресурсных показателей и качества управления РЦ: «объем оборотных средств, затраты трудовых ресурсов».

Далее на основе шаблонов выявления проблем: **выделите проблемы на этапе** [снабжение – хранение – реализация], связанные «с высоким» **уровнем показателя** [ресурсов и качества управления]; **выделите проблемы, связанные «с низкими» уровнем качества** [планирование, мониторинг, учет, контроль, анализ] **на этапе** [снабжение – хранение – реализация] – была разработана анкета и проведено анкетирование руководителей РЦ.

После обработки и анализа содержания анкет на основе шаблонов описания проблем и шаблонов описания бизнес-требований были выделены следующие проблемы в управлении РЦ и соответствующие бизнес-требования к программному комплексу информационной поддержки управления РЦ.

Проблемы:

– «высокий» **уровень показателя** [объем оборотных средств] **на этапе** [хранение товаров];

– «высокий» **уровень показателя** [затраты трудовых ресурсов] **на этапах** [хранение товара и комплектация заказов];

– «низкий» **уровень качества** [планирование, мониторинг, учет контроля, анализ] **на этапах** [снабжение – хранение – реализация товаров].

Бизнес-требования:

– «сократить» **уровень показателя** [объем оборотных средств] **на этапах** [хранение товаров и комплектация заказов] (БТ-1);

– «снизить» **уровень показателя** [затраты материальных и трудовых ресурсов] **на этапах** [хранение товаров и комплектация заказов] «на [10] процентов» (БТ-2);

– «повысить» **уровень качества** [планирование, мониторинг, учет контроля, анализ] **на этапах** [снабжение – хранение – реализация товаров] (БТ-3).

На следующем этапе системный архитектор на основе анализа бизнес-требований, шаблонов пользовательских требований и служебных обязанностей персонала РЦ сформировал следующий набор пользовательских требований:

– [персонал службы производственного отдела] **должен иметь возможность решать задачу** [планирование размеров производственных запасов исходного сырья и полуфабрикатов с учетом ограничений на объемы оборотных средств и обеспечения непрерывности и ритмичности производства готовой продукции] (ТП-1);

– [персонал службы приема и хранения] **должен иметь возможность решать задачу** [планирование приема, размещение и хранение товара на складе с учетом сокращения затраты трудовых ресурсов] (ТП-2);

– [персонал службы комплектации и отгрузки] **должен иметь возможность решать задачу** [планирование отбора, комплектация и доставка в зону отгрузки товара для конкретного потребителя] (ТП-3);

– [персонал службы мониторинга] **должен иметь возможность решать задачу** [мониторинг, учет и контроль движения товара на складе] (ТП-4).

Разработка функциональных требований к программному комплексу осуществляется системным архитектором на основе анализа и детализации требований пользователей с учетом модели жизненного цикла обработки информации и шаблона разработки функциональных требований:

– программный комплекс [ПК1] **должен обеспечить** [сбор, обработку, хранение, защиту] **информации при решении задачи** [планирования размеров производственных запасов исходного сырья и полуфабрикатов] (ФТ-ПК1);

– программный комплекс [ПК2] **должен обеспечить** [регистрацию\*, сбор, передачу, обработку, передачу\*\*, хранение, защиту] **информации при решении задачи** [планирование, размещение и хранение товара на складе] (ФТ-ПК2);

программный комплекс [ПК3] **должен обеспечить** [сбор, обработку, передачу\*\* хранение, защиту] **информации при решении задачи** [планирование отбора, комплектации и доставки в зону отгрузки товара для конкретного потребителя] (ФТ-ПК3);

– программный комплекс [ПК4] **должен обеспечить** [регистрацию\*, сбор, передачу, обработку, передачу\*, хранение, защиту, архивирование] **информации при решении задачи** [мониторинг, учет и контроль движения товара на складе] (ФТ-ПК4).

Логические взаимосвязи между требованиями представлены на рис. 1.

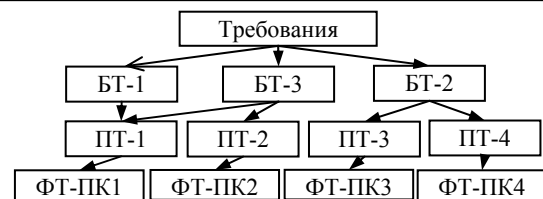


Рис. 1. Структура взаимосвязей между требованиями

### Заключение

Предложенный подход к разработке бизнес-требований и требований пользователей к программному продукту, основанный на использовании содержательных моделей системного анализа и шаблонов проектирования содержания требований в контексте накопленного опыта, ориентирован на решение важной (с точки зрения автора) задачи снижения рисков программных проектов. Использование шаблонов: бизнес-требований, требований пользователей – позволяет унифицировать структуры документов работы с требованиями и процессы разработки требований, облегчить понимание содержательного смысла требований всеми заинтересованными лицами. Представленные результаты апробации предложенного подхода на примере шаблонов требований к информационной системе поддержки управления бизнес-процессами распределительного центра позволяют сделать вывод о пригодности предложенного подхода для решения практических задач. Полученные результаты могут быть полезны специалистам мелких IT-компаний (руководителям проектов, архитекторам программного обеспечения, системным аналитикам) при проведении обследований объектов автоматизации и формировании технических заданий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 8.8184.2017/8.9.

### Литература

1. Автоматизированная программная система управления бизнес-процессами предприятия: задачи, описание, структура / М.Ю. Катаев, А.А. Емельяненко, В.А. Емельяненко и др. // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24) – Ч. 2. – С. 282–289.
2. Катаев М.Ю. Диагностика деятельности предприятия, основанная на оценке эффективности бизнес-процессов / М.Ю. Катаев, А.А. Емельяненко, О.А. Жолобов // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2013. – № 10(53) – С. 53.
3. Hull E. Requirements engineering / E. Hull, K. Jackson, J. Dick. – London [etc.]: Springer Science+Business Media, 2005. – 229 p.
4. Вигерс К. Разработка требований к программному обеспечению: пер. с англ. – М.: Русская редакция, 2004. – 576 с.
5. Фатрелл Р.Т. Управление программными проектами. Достижение оптимального качества при минимуме затрат: пер. с англ. / Р.Т. Фатрелл, Д.Ф. Шафер, Л.И. Шафер. – М.: Вильямс, 2004. – 1136 с.
6. Гранд М. Шаблоны проектирования в Java: пер. с англ. – М.: Новое знание, 2004. – 559 с.
7. Ларман К. Применение UML и шаблонов проектирования: введение в объектно-ориентированный анализ и

проектирование: учеб. пособие: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2001. – 496 с.

8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207–2010. Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств. – М.: Стандартинформ, 2011. – 105 с.

9. IEEE-1074-1997 IEEE Standard for Developing Software Life Cycle Processes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://standards.ieee.org/standard/1074-2006.html>, свободный (дата обращения: 09.03.2019).

10. ГОСТ 28806–90. Качество программных средств. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 8 с.

11. Ехлаков Ю.П. Модели и процедуры продвижения программных продуктов на рынок корпоративных продаж / Ю.П. Ехлаков, Д.Н. Бараксанов, Е.К. Малаховская // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 90–97.

12. Перегудов Ф.И. Основы системного анализа: учеб. / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – 3-е изд. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 396 с.

13. Ехлаков Ю.П. Теоретические основы автоматизированного управления. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2001. – 337 с.

14. Alexander C. A pattern language: Towns, buildings, construction / C. Alexander, S. Ishikawa, M. Silverstein. – N.Y.: Oxford University Press, 1977. – 1171 p.

15. Тюльменков В.Н. Математическая модель и алгоритм решения оптимизации размещения товара на распределительном центре с адресной системой хранения / В.Н. Тюльменков, Ю.П. Ехлаков, О.М. Замятина // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2008. – Т. 313, № 5. – С. 173–176.

16. Ехлаков Ю.П. Проблема автоматизации и оптимизации деятельности распределительного центра предприятия // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 114–116.

### Ехлаков Юрий Поликарпович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизации обработки информации (АОИ)

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

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

Тел.: +7-913-829-55-42

Эл почта: upe@tusur.ru

Ehlaakov Y.P.

### Business and user requirements patterns for engineering and manufacturing type software

An approach based on the system analysis conceptual model is proposed for the development of patterns of business and user requirements for a software product. The following conceptual models of life cycle elements decomposition are presented: business process of final product production, business process management information support, and information processing during business process management information support. In addition, conceptual models of the economic indicators decomposition are described: resource, performance, quality, efficiency of manufacturing management. The authors describe elements of pattern creation language and provide patterns variants for description of problems, business requirements, user and functional requirements. Patterns of requirements for information system for distribution center business process management support presented as example.

**Keywords:** system analysis, decomposition model, life cycle, business processes, requirements design patterns.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-77-82

### References

1. Kataev M.Y., Emelyanenko A.A., Emelyanenko V.A., et al. Automated software system for business processes management of enterprise: tasks, description, structure. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, no. 2(24), pt. 2, pp. 282–289 (in Russ.).

2. Kataev M. Y., Emelyanenko A. A., Zholobov O.A. Enterprise activity diagnostics based on the assessment of business processes effectiveness. *Management of economic systems: scientific electronic journal*, 2013, no. 10(53), pp. 53 (in Russ.).

3. Hull E., Jackson K., J. Dick *Requirements engineering*. London [etc.], Springer Science+Business Media, 2005, 229 p.

4. Wiegers K. *Razrabotka trebovaniy k programmnomu obespecheniyu* [Software Requirements]. M., Russkaya redakciya, 2004, 576 p.

5. Futrell R.T., Shafer D.F., Shafer L.I. *Upravlenie programmnyimi proektami dostizhenie optimalnogo kachestvari minimum zatrat* [Quality Software Project Management]. M., Williams, 2004, 1136 p.

6. Grand M. *Shablony proektirovaniya v Java* [Patterns in Java], M., Novoe znanie, 2004, 559 p.

7. Larman C. *Primenenie UML i shablonov proektirovaniya Vvedenie v obektno-orientirovannyj analiz i proektirovanie ucheb posobie* [Applying UML and patterns: An introduction to Object-Oriented analysis and Design and Unified Process]. M/, Williams, 2001, 496 p.

8. ГОСТ Р ИСО/ IEC 12207–2010 Information technology. System and software engineering. Software life cycle processes. Moscow, Standartinform, 2011, 105 p. (in Russ.).

9. IEEE-1074-1997 IEEE Standard for Developing Software Life Cycle Processes. Available at: <https://standards.ieee.org/standard/1074-2006.html> (accessed: March 9, 2019).

10. ГОСТ 28806–90 Software quality. Terms and Definitions. Moscow, Standards Publ., 1991. 8 p. (in Russ.).

11. Ehlakov Y.P., Baraksanov E.K., Malahovskaya E.K. Models and procedures for promoting software products to the corporate sales market. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 90–97 (in Russ.).

12. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. *Osnovy sistemnogo analiza: Uchebnik* [Basics of system analysis: Textbook], 3-rd ed. Tomsk, NTL Publ., 2001, 396 p.

13. Ehlakov Y.P. *Teoreticheskie osnovy avtomatizirovanogo upravleniya* [Theoretical bases of automated control]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2001, 337 p.

14. Alexander C., Ishikawa S., Silverstein M. *A pattern language: Towns, buildings, construction*. N.Y., Oxford University Press, 1977, 1171 p.

15. Tyulmenkov V.N., Ehlaakov Y.P., Zamyatina O.M. Mathematical model and algorithm for optimizing the placement of goods at a distribution center with an address storage system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 313, no. 5, pp. 173–176 (in Russ.).

16. Ehlaakov Y.P. The problem of automation and optimization of the enterprise distribution center. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, no. 2(24), pt. 3, pp. 114–116 (in Russ.).

### Ehlaakov Yuri P.

Doctor of Engineering, Assistant Professor, Department of Automation of Information Processing,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7-913-829-55-42

Email: upe@tusur.ru

УДК 004.932

Р.А. Чугунов, А.Д. Кульневич, С.В. Аксенов

## Методика построения карт глубины стереоизображения с помощью капсульной нейронной сети

Дана оценка работе капсульной нейронной сети в задаче построения карты глубины по стереоизображению. Выполнены обзор существующих решений и теоретический обзор для решения задачи разработки программы. Описана структура нейронной сети и процесс ее обучения.

**Ключевые слова:** стереоизображение, карта глубины, машинное обучение.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-83-86

Обработка стереоизображений с целью получения карты глубины изображения является важной задачей для исследования в области компьютерного зрения. Карта глубины изображения содержит информацию о расстоянии до объектов на данном изображении. Основными применениями могут быть как 3D-телевидение (3DTV) и телевидение со свободной точкой зрения (Free Viewpoint Television) [1–4], так и создание 3D-сенсоров. Такие сенсоры, позволяющие определять расстояние до объектов и строить трехмерную модель окружающего пространства, могут помочь при решении многих задач робототехники, дополненной и виртуальной реальности [5–7]. В частности, в робототехнике задаче SLAM (одновременное построение карты и локализация робота). В [8] карты глубины используются для навигации антропоморфного робота. На рис. 1 представлен пример карты глубины.

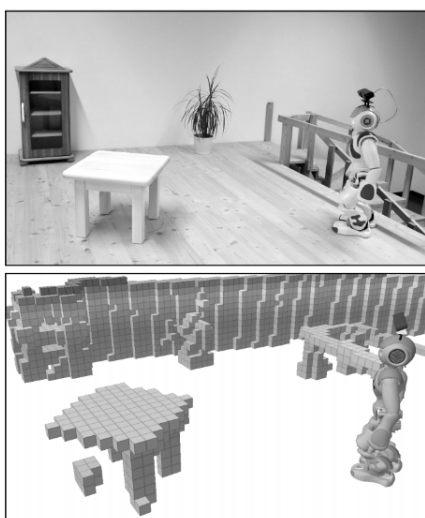


Рис. 1. Навигация антропоморфного робота с помощью карты глубины

В данной работе предлагается использовать капсульную нейронную сеть для решения задачи построения карты глубины по двум RGB-изображением стереопары. В отличие от традиционных методов стереорекострукции предлагаемая методика основана на использовании капсульной нейронной сети и напрямую не использует никаких знаний о геометрии стереозрения.

Целью данной работы является использование капсульных нейронных сетей как средства построение карт глубины для систем стереозрения, что является хорошим компромиссом между точностью карт и скоростью их построения. Также использование методов глубокого обучения может помочь строить карты глубины для изображений со сложным освещением, текстурой и пересечениями объектов.

### Обзор литературы

Методы стереорекострукции широко исследовались с самого появления компьютерного зрения. Главной проблемой, которую данные методы пытаются решить, является проблема совмещения: имея два изображения одной и той же сцены, требуется совместить пиксели первого изображения с пикселями второго.

Существует большое число алгоритмов для решения данной проблемы, они обычно принадлежат одной из двух категорий: локальные методы и глобальные методы [9]. Как правило, эти методы сводят задачу совмещения пикселей исходных изображений к совмещению пикселей ректифицированных изображений [10, 11]. По паре соответствующих точек можно выполнить триангуляцию и определить координаты их прообраза в трехмерном пространстве. Зная трехмерные координаты прообраза, глубина вычисляется как расстояние до плоскости камеры.

Локальные методы часто используются, когда требуется работа в реальном времени и производительность ценится выше точности. Такие методы часто включают в себя минимизацию фотометрической ошибки, которая рассчитывается по окружающим пикселям изображений. Для расчета ошибки могут использоваться различные функции, например: сумма модулей разностей (SAD), взаимная корреляция, L2-норма и т.д. Эти методы, как правило, имеют большой процент ошибок в сценах со сложным освещением, зачастую полученные карты глубины зашумлены.

Глобальные методы используются в случае, когда точность построенной карты глубины важнее вычислительной эффективности алгоритма. Поэтому такие методы, как правило, используются в тех приложениях, в которых не требуется работа в реальном времени. Эти алгоритмы добавляют условие пространственной гладкости к задаче минимизации фотометрической ошибки.

Капсульные нейронные сети уже применялись в задаче сегментации изображений [12]. В данной работе применена нейронная сеть такой же структуры, однако в применении к задаче построения карты глубины. В такой сети используются сверточные и капсульные слои. Данные алгоритмы относятся к классу локальных методов. В [13, 14] сверточная сеть использовалась для расчета карты глубины по одному изображению, в [15] сеть такого типа использовалась для определения соответствующих друг другу частей левого и правого изображений, однако построение карты глубины основывалось на традиционных методах стереорекострукции. В [16] полносвязная нейронная сеть обучалась на разреженных векторах признаков для построения карты глубины по одному изображению. Применение капсульных сетей в прикладных задачах пока не отражено широко в научных публикациях.

### Проверка алгоритма

Выборка для разработки алгоритма создавалась процедурно. Генерация синтетической выборки изображений для обучения осуществлялась с помощью программы для создания трехмерной компьютерной графики, а также языка программирования Python. Всего было получено 5619 изображений трехмерных фигур на произвольном расстоянии и под произвольным углом к стереокамере.

Сверточные слои часто применяются в задачах сегментации, где входное изображение преобразуется в маску, каждый пиксель которого может иметь одно из дискретных значений – индекс класса, к которому относится данный объект изображения. Од-

нако если не преобразовывать выходное изображение в бинарную маску, то сверточные или капсульные сети можно также использовать для построения карты глубины. В данном случае на вход нейронной сети поступают левое и правое изображения, объединенные по вертикали в единое изображение размера  $720 \times 640$  пикселей (части стереоизображения по отдельности имеют размер  $360 \times 320$  пикселей). На рис. 2 представлен пример стереоизображения.

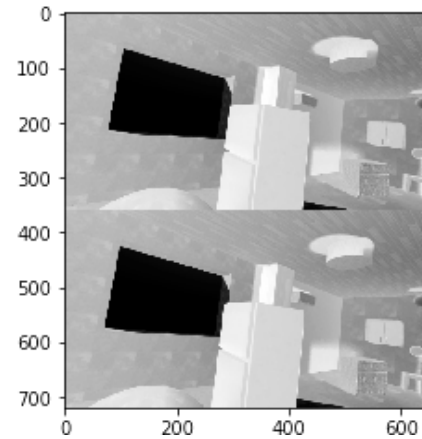


Рис. 2. Пример стереоизображения

Используется нейронная сеть, построенная на основе сети SegCaps.

Данная структура капсульной нейронной сети основана на сверточной нейронной сети U-Net [17] для сегментации изображений. На рис. 3 представлена структура нейронной сети SegCaps.

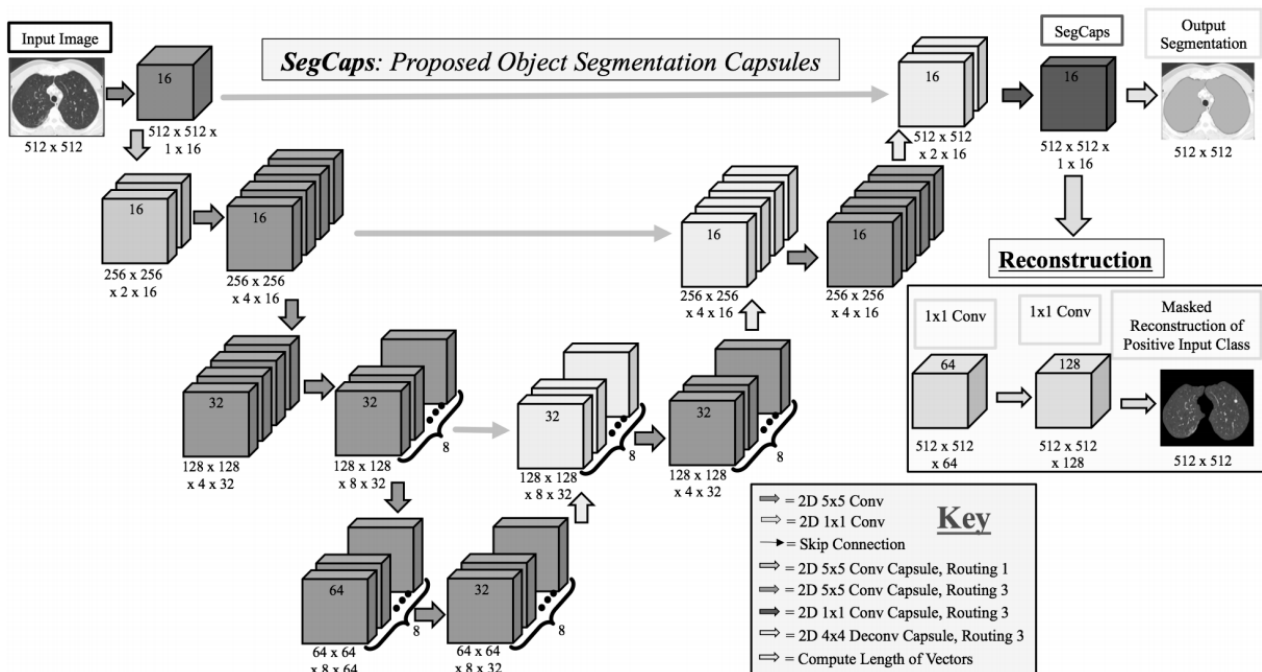


Рис. 3. Структура нейронной сети SegCaps

Процесс обучения нейронной сети состоит из следующих шагов:

1. Считываются сгенерированные стереоизображения и карты глубины.

2. Значение каждого пикселя делятся на 255, значения карт глубины делятся на 10, чтобы быть в пределах от 0 до 1.

3. Созданная выборка изображений случайным образом (распределение вероятностей – равномерное) разбивается на тестовую, валидационную и обучающую в пропорции 10/10/80%. Обучающая выборка используется для обучения нейронной сети, валидационная используется для оптимизации параметров. Тестовая выборка требуется для окончательной несмещенной оценки работы алгоритма.

4. Создается нейронная сеть приведенной выше структуры.

5. Обучающая выборка подается на вход модели.

6. Выполняется обучение модели, в качестве оптимизируемой функции: среднеквадратическая ошибка между истинными картами глубины и прогнозируемыми ответами (mean squared error) на обучающей выборке. Модель обучается до тех пор, пока за последние 5 эпох есть уменьшение минимальной среднеквадратической ошибки на валидационной выборке (проверка выполняется каждую эпоху обучения).

**Результаты**

По итогам обучения нейронной сети была оценена средняя относительная ошибка расчета глубины на тестовой выборке. На рис. 4 представлен пример построенной нейронной сетью карты глубины.

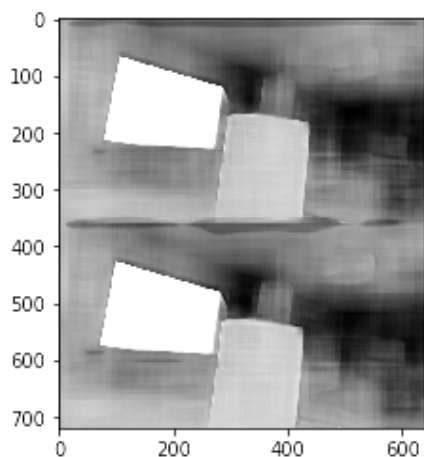


Рис. 4. Пример карты глубины, построенной нейросетью на тестовой выборке

Было проведено сравнение по качеству и скорости работы метода на основе нейронной сети с классической сверточной сетью U-Net, обученной на той же выборке. Результаты сравнения представлены в таблице.

**Результаты сравнения**

Метод	Классический U-Net	Капсульная нейронная сеть
Средняя абсолютная ошибка, м	0,43	0,25
Время построения одного изображения, с	0.02	0,0233
Частота обработки, кадров/с	50	43

Капсульная сеть позволяет точнее строить карты глубины, чем полностью сверточная нейронная сеть.

**Заключение**

Показана эффективность работы капсульных нейронных сетей в задаче построения карты глубины по стереоизображению. Методика не требует использования других способов обработки изображений, в частности, алгоритмов получения разностного изображения и фильтрации шумов. Данная методика позволяет заметно снизить ошибку определения глубины стереоизображения.

*Литература*

- Zhang K. Cross-based local stereo matching using orthogonal integral images / K. Zhang, J. Lu, G. Lafruit // Circuits and Systems for Video Technology // IEEE Transactions on. – 2009. – Vol. 19(7). – P. 1073–1079.
- Graham T. 3d image sequence acquisition for tv & film production / T. Graham, O. Grau // In 3DPVT. – IEEE. – 2002. – 320 p.
- Flack J. Low-bandwidth stereoscopic image encoding and transmission / J. Flack, P.V. Harman, S. Fox // In Electronic Imaging 2003. – International Society for Optics and Photonics. – 2003. – P. 206–214.
- Fehn C. Depth-image-based rendering (dibr), compression, and transmission for a new approach on 3d-tv // In Electronic Imaging 2004. – International Society for Optics and Photonics. – 2004. – P. 93–104.
- Kim H. 3d scene reconstruction from multiple spherical stereo pairs / H. Kim, A. Hilton // International journal of computer vision. – 2013. – Vol. 104(1). – P. 94–116.
- Dynamic 3d scene reconstruction in outdoor environments / H. Kim, M. Sarim, T. Takai, J.Y. Guillemaut, A. Hilton // In Proc. IEEE Symp. on 3D Data Processing and Visualization. – 2010. <https://core.ac.uk/download/pdf/30340214.pdf>
- Schonbein M. Omnidirectional 3d reconstruction in augmented manhattan worlds / M. Schonbein, A. Geiger // In Intelligent Robots and Systems (IROS 2014). – 2014. – IEEE / RSJ International Conference. – 2014. – P. 716–723.
- Maier D. Real-Time Navigation in 3D Environments Based on Depth Camera Data / D. Maier, A. Hornung, M. Bennewitz // 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012). – 2012. – P. 692–697.
- Mohan D. A Review on Depth Estimation for Computer Vision Applications / D. Mohan, Dr. A. R. Ram // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). – 2015. – Vol. 4. – Is. 11. – <https://pdfs.semanticscholar.org/f75b/2030713b36adde9b9d551ee003c20bac3ca.pdf>
- Fusiello A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs / A. Fusiello, E. Trucco, A. Verri // Machine Vision and Applications. – 2000. – Vol. 12(1). – P. 16–22.
- Szeliski R. Computer vision: algorithms and applications // Springer Science & Business Media. – 2010. – [http://szeliski.org/Book/drafts/SzeliskiBook\\_20100903\\_draft.pdf](http://szeliski.org/Book/drafts/SzeliskiBook_20100903_draft.pdf)
- LaLonde R. Capsules for Object Segmentation / R. LaLonde U. Bagci // CoRR. – 2018. – <https://openreview.net/pdf?id=B1L4Gb3sf>
- Eigen D. Depth map prediction from a single image using a multi-scale deep network / D. Eigen, C. Puhrsch, R. Fergus // In Advances in Neural Information Processing Systems. – 2014. – P. 2366–2374.
- Liu F. Deep convolutional neural fields for depth estimation from a single image / F. Liu, C. Shen, G. Lin // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2015. – P. 5162–5170.
- Zbontar J. Stereo Matching by Training a Convolutional Neural Network to Compare Image Patches / J. Zbontar, Y. LeCun // Journal of Machine Learning Research. – 2016. – Vol. 17, No. 65. – P. 1–32.

16. Depth estimation from monocular infrared images based on svm model / L. Xi, S. Sun, L. Li, F. Zou // *Laser & Infrared*. – 2012. – Vol. 11:025. – P. 111–115.

17. Ronneberger O. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, Springer, LNCS, 2015. – Vol. 9351. – P. 234–241.

#### Чугунов Роман Анварович

Магистрант отд. информационных технологий (ОИТ) Инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-106-49-63  
Эл. почта: manofnovel@gmail.com

#### Кульневич Алексей Дмитриевич

Магистрант отд. ОИТ ИШИТР НИ ТПУ Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-952-892-68-90  
Эл. почта: kulnevich94@mail.ru

#### Аксенов Сергей Владимирович

Канд. техн. наук, доцент отд. ОИТ ИШИТР НИ ТПУ Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-887-47-90  
Эл. почта: axyonov@tpu.ru

Chugunov R.A., Kulnevich A.D., Aksenov S.V.

#### Depth estimation based on convolutional neural networks

In this paper, the SegCaps neural networks were tested on the task of depth map prediction using stereo images. Overview of existing solutions was carried out to develop the algorithm. The article describes the structure of the neural network and the network training process.

**Keywords:** stereo image, depth map, machine learning.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-83-86

#### References

1. K. Zhang, J. Lu, G. Lafruit. Cross-based local stereo matching using orthogonal integral images. *Circuits and Systems for Video Technology. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* on, 2009, vol. 19(7), pp. 1073–1079.

2. T. Graham, O. Grau. 3d image sequence acquisition for tv & film production. In 3DPVT. *IEEE*, 2002, 320 p.

3 J. Flack, P.V. Harman, S. Fox. Low-bandwidth stereoscopic image encoding and transmission. In *Electronic Imaging 2003. International Society for Optics and Photonics*, 2003, pp. 206–214.

4. Fehn C. Depth-image-based rendering (dibr), compression, and transmission for a new approach on 3d-tv. In *Electronic Imaging 2004. International Society for Optics and Photonics*, 2004, pp. 93–104.

5. H. Kim, A. Hilton. 3d scene reconstruction from multiple spherical stereo pairs. *International journal of computer vision*, 2013, vol. 104(1), pp. 94–116.

6. H. Kim, M. Sarim, T. Takai, J.Y. Guillemaut, A. Hilton. Dynamic 3d scene reconstruction in outdoor environ-

ments. In *Proc. IEEE Symp. on 3D Data Processing and Visualization*, 2010. <https://core.ac.uk/download/pdf/30340214.pdf>

7. M. Schonbein, A. Geiger. Omnidirectional 3d reconstruction in augmented manhattan worlds. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014, IEEE/RSJ International Conference, 2014, pp. 716–723.

8. D. Maier, A. Hornung, M. Bennewitz. Real-Time Navigation in 3D Environments Based on Depth Camera Data. *12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*, 2012, pp. 692–697.

9. D. Mohan, Dr. A. R. Ram. A Review on Depth Estimation for Computer Vision Applications. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2015, Vol. 4, Is. 11. <https://pdfs.semanticscholar.org/f75b/2030713b36adde9b9d551ee003c20bac3ca.pdf>

10. A. Fusiello, E. Trucco, A. Verri. A compact algorithm for rectification of stereo pairs. *Machine vision and applications*, 2000, vol. 12(1), pp. 16–22.

11. Szeliski R. Computer vision: algorithms and applications. *Springer Science & Business Media*, 2010. [http://szeliski.org/Book/drafts/SzeliskiBook\\_20100903\\_draft.pdf](http://szeliski.org/Book/drafts/SzeliskiBook_20100903_draft.pdf)

12. R. LaLonde U. Bagci. Capsules for Object Segmentation. *CoRR*, 2018. <https://openreview.net/pdf?id=B1L4Gb3sf>

13. D. Eigen, C. Puhrsch, R. Fergus. Depth map prediction from a single image using a multi-scale deep network. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014, pp. 2366–2374.

14. F. Liu, C. Shen, G. Lin. Deep convolutional neural fields for depth estimation from a single image. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 5162–5170.

15. J. Zbontar, Y. LeCun. Stereo Matching by Training a Convolutional Neural Network to Compare Image Patches. *Journal of Machine Learning Research*, 2016, vol. 17, no. 65, pp. 1–32.

16. L. Xi, S. Sun, L. Li, F. Zou. Depth estimation from monocular infrared images based on svm model. *Laser & Infrared*, 2012, vol. 11:025, pp. 111–115.

17. O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox. Ronneberger O. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, Springer, LNCS, 2015, vol. 9351, pp. 234–241.

#### Roman A. Chugunov

Master student, Department of Information Technologies (DIT), Engineering School of Information Technology and Robotics (ESITR), National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU) 30, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-106-49-63  
Email: manofnovel@gmail.com

#### Aleksey D. Kulnevich

Master student DIT, ESITR, NR TPU 30, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-892-68-90  
Email: a.d.kulnevich@gmail.ru

#### Sergey V. Akkenov

Candidate of Engineering, Assistant Professor, DIT, ESITR, NR TPU 30, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-887-47-90  
Email: axyonov@tpu.ru

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**





УДК 629.7.064.54

В.И. Апасов, А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко

## Исследование работы комбинированного понижающе-повышающего преобразователя для высоковольтной энергопреобразующей аппаратуры\*

Разработана численно-аналитическая математическая модель комбинированного понижающе-повышающего преобразователя постоянного напряжения для анализа его работы в составе высоковольтной энергопреобразующей аппаратуры. Приведена схема рассматриваемого преобразователя, установлены номиналы компонентов силовой части устройства, обеспечивающие его функционирование на нагрузку не более 1 кВт. Показаны эпюры выходного напряжения в различных режимах работы, а также двухпараметрические бифуркационные диаграммы, позволяющие определить области нормальной работы устройства с минимальными пульсациями выходного напряжения, где исключено возникновение субгармонических колебаний.

**Ключевые слова:** комбинированный понижающе-повышающий преобразователь напряжения, математическая модель, двухпараметрическая бифуркационная диаграмма, область нормальной работы.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-89-94

Современные источники автономных систем электропитания строятся на основе различных схемотехнических решений, в большинстве своем – на основе DC-DC-преобразователей. Выбор структуры построения определяется требованиями конкретной разработки, а также параметрами входных источников и характером выходных потребителей. Чаще всего подобные преобразователи применяются в системах питания с мощностью до нескольких десятков киловатт. Также все более широко внедряются высоковольтные шины питания с уровнем стабильного выходного напряжения, равным 100 В. Такое увеличение питающего напряжения обусловлено требованиями уменьшения массогабаритных

показателей систем электропитания, а также снижения больших токов в проводящих цепях, что позволяет сократить тепловые потери мощности.

Рассматриваемый комбинированный понижающе-повышающий преобразователь напряжения (КППН) является одним из вариантов схемотехнического исполнения силовых устройств (рис. 1), относится к гальваносвязанным импульсным преобразователям постоянного напряжения и представляет собой последовательное соединение понижающего и повышающего преобразователей с общим накопительным дросселем [1]. В качестве входного источника выступает аккумуляторная или фотоэлектрическая батарея.

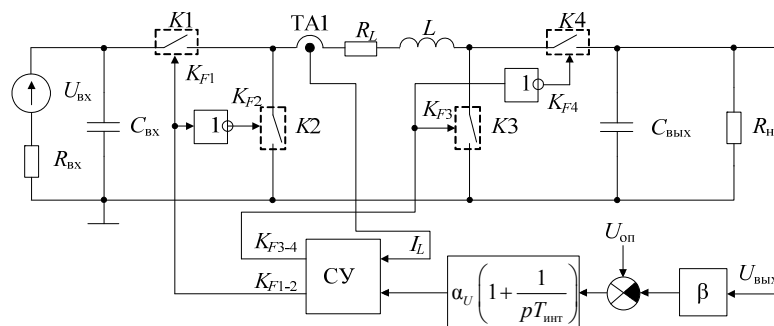


Рис. 1. Структурная схема КППН со стабилизацией выходного напряжения и ограничением тока дросселя

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $U_{\text{вх}}$  – напряжение входного источника;  $R_{\text{вх}}$  – сопротивление входного источника;  $C_{\text{вх}}$ ,  $C_{\text{вых}}$  – емкости входного и выходного фильтра соответственно;  $R_L$  – суммарное активное сопротивление обмотки дросселя и цепи; TA1 – датчик тока дросселя;  $L$  – индуктивность накопительного дросселя;  $R_H$  – сопротивление нагрузки;  $K1...K4$  – ключевые элементы (ключи);  $K_{F1}...K_{F4}$  – коммутационные функции соответствующих ключей  $K1...K4$ ; СУ – система управления преобразователя;  $I_L$  – измеренный ток дросселя;

$U_{\text{вых}}$  – измеренное напряжение выходного напряжения;  $U_{\text{оп}}$  – опорное напряжение;  $\beta$  – коэффициент преобразования обратной связи;  $\alpha_U$  – коэффициент усиления сигнала ошибки.

Более подробно принцип работы устройства и способ построения системы управления рассмотрены ранее [2, 11], отметим только его важную особенность – получение выходного напряжения как выше, так и ниже по номиналу напряжения входного источника при одинаковой полярности. Благодаря этому КППН может найти широкое применение в

\* Материал частично был представлен в диссертации В.И. Апасова [11].

различных системах вторичного электропитания. Наличие токовой связи позволяет обеспечить плавный запуск преобразователя в режиме повышения входного напряжения, а также исключить протекание токов большой амплитуды через ключ  $K3$ , что улучшает переходные процессы в устройстве [3–8].

Управление ключами осуществляется путем использования широтно-импульсного регулирования на основе двухзонного разветвляющего напряжения: для понижающей (группа синхронных ключей –  $K1, K2$ ) и повышающей (группа синхронных ключей –  $K3, K4$ ) частей КПППН. Принцип работы системы управления, а также диаграммы ее работы подробно описаны в [9]. Ключи  $K1$ – $K4$  могут переходить во включенное состояние только в начале периода коммутации.

Ранее было рассмотрено применение аналогичного преобразователя [10, 11] в низковольтных (до 30 В) системах электроснабжения и показана принципиальная возможность его использования в том случае, когда напряжение входного источника может изменяться в диапазоне от  $0,5$  до  $1,5U_{\text{вых}}$ . Дополнительно была определена экспериментальная зависимость коэффициента усиления сигнала ошибки звена обратной связи  $\alpha_U$  от входного напряжения, тока нагрузки и емкости выходного фильтра как наиболее влияющих на характер выходного напряжения ( $m$ -циклы).

На основании полученной зависимости возможно очертить область допустимой работы КПППН в одноцикловых режимах, характеризующихся пониженными пульсациями выходного напряжения гармонической формы и обеспечивающих оптимальные энергетические характеристики. Именно поэтому необходимо провести подобное исследование применения КПППН в высоковольтных системах энергопитания (свыше 60 В), что позволит в дальнейшем расширить область его использования с учетом нелинейных динамических характеристик импульсных преобразователей.

Как сказано ранее, силовая часть КПППН представляет собой последовательное соединение понижающего и повышающего преобразователей постоянного напряжения. Расчет номиналов их компонентов ведется на основании известных методик [2, 12–15].

Исходные данные для расчета компонентов силовой части:

- изменение напряжения на входе преобразователя  $U_{\text{вх}}$  от 50 В ( $U_{\text{вх min}}$ ) до 150 В ( $U_{\text{вх max}}$ );
- изменение тока нагрузки  $I_{\text{вых}}$  от 1 А ( $I_{\text{вых min}}$ ) до 10 А ( $I_{\text{вых max}}$ );
- частота коммутации ключей  $f_{\text{sw}}$  50 кГц;
- выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  (100,0±1,0) В.

В результате расчета получается, что для обеспечения требуемых выходных характеристик преобразователя параметры силовых элементов схемы должны быть следующими:

- индуктивность дросселя не менее  $L=700$  мкГн;
- емкость входного фильтра не менее  $C_{\text{вх}}=1$  мФ;

– емкость выходного фильтра не менее  $C_{\text{вых}}=10$  мФ.

Коммутационная функция  $K_F$  зависит от функции обратной связи  $\xi$ , являющейся разностью сигнала ошибки и разветвляющего напряжения (в данном устройстве – линейно нарастающее пилообразное). В результате напряжения коммутационных функций будут представлять собой широтно-импульсные модуляционные управляющие сигналы.

В проведенных исследованиях в качестве звена обратной связи КПППН применяется пропорционально-интегральный регулятор (с постоянной интегрирования  $T_{\text{инт}}$  и граничной частотой интегрирования 2 кГц).

Математическая модель КПППН строится на основе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка в базисе коммутационных разрывных функций  $K_F(\xi)$ :

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}(K_F(\xi))\mathbf{X} + \mathbf{B}(K_F(\xi)), \quad (1)$$

где  $\mathbf{X}$  – вектор переменных состояний  $\{i_L, U_{C_{\text{вх}}}, U_{C_{\text{вых}}}, U_{C_{\text{инт}}}\}$ .

В свою очередь,  $i_L$  – ток в дросселе;  $U_{C_{\text{вх}}}$  – напряжение на входном конденсаторе;  $U_{C_{\text{вых}}}$  – напряжение на выходном конденсаторе;  $U_{C_{\text{инт}}}$  – напряжение на конденсаторе пропорционально-интегрирующего звена в цепи обратной связи.

В ходе исследования рассмотрена работа КПППН на каждом тактовом интервале (I, II, III) – временной интервал, при котором ключи  $K1$ – $K4$  преобразователя не изменяют свое состояние. Для этого построена схема замещения на тактовом интервале, после чего составлена система уравнений токов и напряжений в схеме и выражены основная матрица ( $\mathbf{A}$ ) и матрица связи ( $\mathbf{B}$ ) для трех интервалов работы (табл. 1). Более подробно с принципами получения матриц  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  схемы, а также получившимися дифференциальными уравнениями можно ознакомиться в работах [9, 11].

Анализ работы КПППН проведен, исходя из режима непрерывных токов, поскольку именно при этом режиме пульсации выходного напряжения будут минимальны. Режим прерывистых токов возможен при работе на малую нагрузку и не столь критичен, как режимы с оптимальной и максимальной нагрузками.

В соответствии с описанным функционирование КПППН в одноцикловом режиме может осуществляться по следующим алгоритмам (с учетом интервалов, представленных в табл. 1):

- режим понижения входного напряжения (интервалы: III-II-III-...);
- режим повышения входного напряжения (интервалы: II-I-II-...);
- переход между режимами понижения и повышения (интервалы: III-II-III-II-I-II-I-...);
- переход между режимами повышения и понижения (интервалы: II-I-II-III-II-III-II-...).

Возможны изменения указанных алгоритмов в связи с возникновением субгармонических колебаний, являющихся искомыми в данной работе. С учетом полученных матриц состояния, а также принципа работы устройства решение системы дифференциальных уравнений (1) представляет собой систему [11, 16]

$$\begin{cases} \mathbf{X}(t_{k2}) = e^{\mathbf{A}_I [t_{k2} - (k-1)\tau]} \mathbf{X}((k-1)\tau) - \mathbf{A}_I^{-1} \mathbf{B}_I; \\ \mathbf{X}(t_{k1}) = e^{\mathbf{A}_{II} [t_{k1} - t_{k2}]} \mathbf{X}(t_{k2}) - \mathbf{A}_{II}^{-1} \mathbf{B}_{II}; \\ \mathbf{X}(k\tau) = e^{\mathbf{A}_{III} [k\tau - t_{k1}]} \mathbf{X}(t_{k1}) - \mathbf{A}_{III}^{-1} \mathbf{B}_{III}. \end{cases} \quad (2)$$

В данной системе  $t_{k1}$ ,  $t_{k2}$  – момент коммутации ключей  $K1$ ,  $K2$  и  $K3$ ,  $K4$  соответственно;  $\tau$  – период тактового интервала;  $k$  – номер тактового периода.

Таблица 1

Матрицы А и В КППНН

Интервал	Матрица А	Матрица В
I ( $K_{F1}=1$ , $K_{F2}=0$ , $K_{F3}=1$ , $K_{F4}=0$ )	$\begin{bmatrix} \frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_{ВХ}} & -\frac{1}{C_{ВХ}R_{ВХ}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_{ВЫХ}R_{ВЫХ}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{ИНТ}\beta} & -\frac{1}{T_{ИНТ}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ U_{ВХ} \\ C_{ВХ}R_{ВХ} \\ 0 \\ U_{ОП} \\ T_{ИНТ} \end{bmatrix}$
II ( $K_{F1}=1$ , $K_{F2}=0$ , $K_{F3}=0$ , $K_{F4}=1$ )	$\begin{bmatrix} \frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_{ВХ}} & -\frac{1}{C_{ВХ}R_{ВХ}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{ВЫХ}} & 0 & -\frac{1}{C_{ВЫХ}R_{ВЫХ}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{ИНТ}\beta} & -\frac{1}{T_{ИНТ}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ U_{ВХ} \\ C_{ВХ}R_{ВХ} \\ 0 \\ U_{ОП} \\ T_{ИНТ} \end{bmatrix}$
III ( $K_{F1}=0$ , $K_{F2}=1$ , $K_{F3}=0$ , $K_{F4}=1$ )	$\begin{bmatrix} \frac{R_L}{L} & 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_{ВХ}R_{ВХ}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{ВЫХ}} & 0 & -\frac{1}{C_{ВЫХ}R_{ВЫХ}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{ИНТ}\beta} & -\frac{1}{T_{ИНТ}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ U_{ВХ} \\ C_{ВХ}R_{ВХ} \\ 0 \\ U_{ОП} \\ T_{ИНТ} \end{bmatrix}$

На основании разработанной математической модели синтезированы алгоритмы подпрограмм определения вектора неизвестных  $\mathbf{X}$  в пакете MATLAB. В работе КППНН выявляются как одноцикловые режимы работы (рис. 2, а), так и  $m$ -цикловые режимы с субгармоническими колебаниями выходного напряжения (рис. 2, б).

Работа КППНН в режимах с субгармоническими колебаниями приводит к повышенной загруженности емкостей выходного фильтра, что дополнительно обуславливает требования к их токовой нагрузке. Также в подобных режимах значительно ухудшаются энергетические характеристики преобразователя, которые снижаются примерно на 1–2% за счет протекания токов большей амплитуды через элементы схемы.

Расчетное значение КПД КППНН в номинальном режиме составляет не менее 96%, при исполь-

зовании ключей с сопротивлением открытого канала не более 20 мОм и временами включения (отключения) не более 200 нс, а также материала сердечника дросселя на основе аморфного и нанокристаллического сплава с удельными потерями, не превышающими 5 Вт/см<sup>3</sup>.

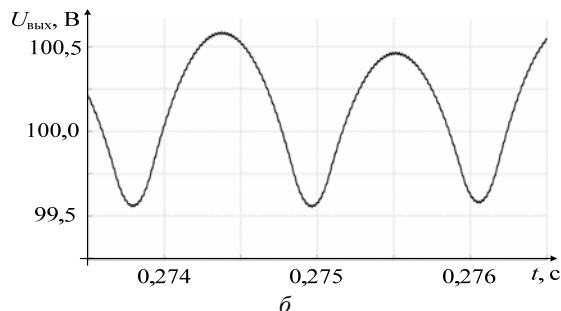
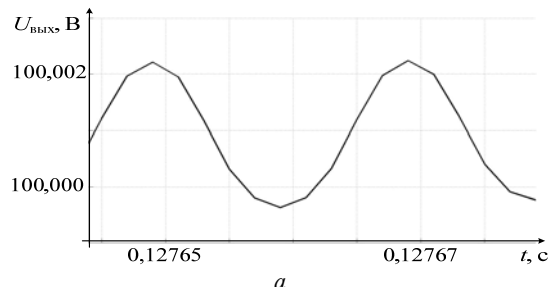


Рис. 2. Выходное напряжение КППНН при  $U_{ВХ} = 150$  В,  $I_{ВЫХ} = 1$  А,  $C_{ВЫХ} = 0,05$  Ф в одноцикловом при  $\alpha_U = 5$  (а) и  $m$ -цикловом при  $\alpha_U = 30$  (б) режимах

Анализ поведения работы КППНН возможно провести на основе бифуркационного исследования [16]. Наиболее наглядно о поведении рассматриваемого преобразователя можно судить по двухпараметрическим бифуркационным диаграммам, которые показывают состояние системы при одновременном изменении двух независимых параметров (рис. 3, 4), например, емкости выходного фильтра и коэффициента усиления сигнала ошибки напряжения обратной связи, при различных входных напряжениях и токах нагрузки с соответствующими коэффициентами пульсаций выходного напряжения ( $K_U$ ). Отметим, что изменение параметров силовой части схемы, а также параметров системы управления может быть вызвано деградацией элементов под воздействием различных факторов (времени, температуры и др.).

По бифуркационным диаграммам определяются граничные значения коэффициента усиления  $\alpha_{U_{ГР}}$  в зависимости от емкости выходного фильтра  $C_{ВЫХ}$ , при которых  $K_U$  составляет менее 5% (табл. 2) (менее 0,05 на рис. 3 и 4).

Анализ полученных диаграмм показывает, что зона аномальной работы КППНН, при которой возникают субгармонические колебания выходного напряжения, четко выделена и распознаваема. В системе классифицированы следующие виды бифуркации: локальные бифуркации Андронова–Хопфа [16, 17] (на момент их возникновения в фазовом пространстве создается состояние, при котором новая

траектория сходится к траектории движения, ставшей неустойчивой) и С-бифуркации удвоения периода [16, 18] (при которых происходит расщепление исходной траектории на двухоборотную, определяющую субгармонические колебания выходного напряжения). Последний тип бифуркаций нельзя определить при помощи мультипликаторов, и зачастую их оценка может быть выполнена только на основании численного эксперимента.

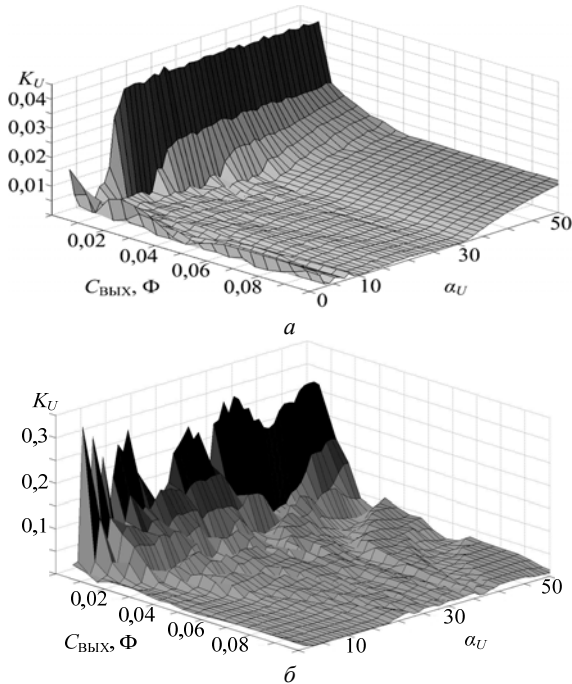


Рис. 3. Двухпараметрические бифуркационные диаграммы при  $U_{\text{вх}} = 50$  В и токе нагрузки 1 А (а) и 10 А (б)

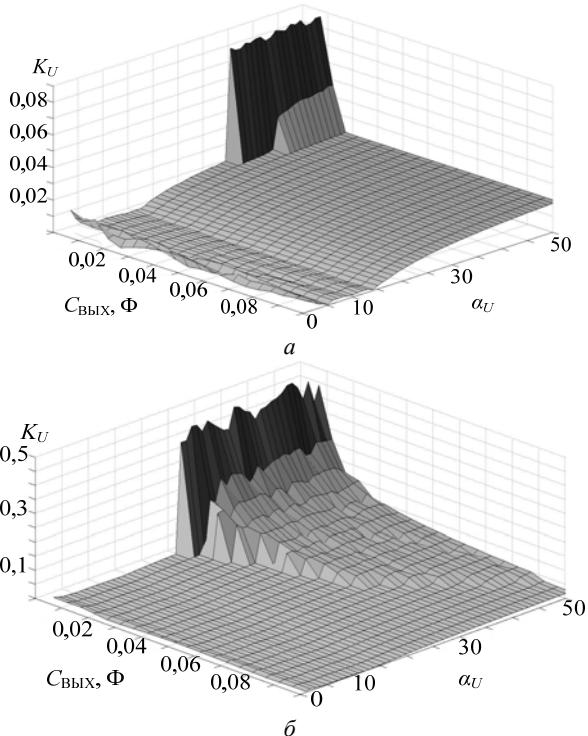


Рис. 4. Двухпараметрические бифуркационные диаграммы при  $U_{\text{вх}} = 150$  В и токе нагрузки 1 А (а) и 10 А (б)

Таблица 2  
Граничные значения коэффициента усиления ( $\alpha_{U_{\text{гр}}}$ ) в зависимости от емкости выходного фильтра ( $C_{\text{ввых}}$ )

$U_{\text{вх}}$ , В	$I_{\text{ввых}}$ , А	Значение коэффициента $\alpha_{U_{\text{гр}}}$ при $C_{\text{ввых}}$ , мФ				
		10	30	50	70	100
50	1	>50	>50	>50	>50	>50
	5	6	32	49	>50	>50
	10	3	15	35	>50	>50
150	1	30	>50	>50	>50	>50
	5	28	34	48	>50	>50
	10	24	26	28	>50	>50

По результатам численно-аналитического эксперимента, а также данных, полученных ранее [11], критическое значение коэффициента усиления КПППН наиболее явно зависит от напряжения входного источника, тока нагрузки, а также емкости выходного фильтра. В аналитической записи эта зависимость будет иметь следующий вид:

$$\alpha_{U_{\text{гр}}} = K_{\alpha} U_{\text{вх}} (200 C_{\text{ввых}} + 0,41) \times \times I_{\text{ввых}} (1,37 U_{\text{вх}} C_{\text{ввых}} - 27 C_{\text{ввых}} - 0,1 U_{\text{вх}} + 1,85), \quad (3)$$

где  $K_{\alpha}$  – поправочный коэффициент, определяемый экспериментально и зависящий от параметров элементов схемы, а также характера монтажа.

Таким образом, область работы КПППН находится в режимах с пульсациями выходного напряжения менее 5% при малых значениях коэффициента усиления  $\alpha_U$  (не более 30) и емкости выходного фильтра более 50 мФ, достаточной для обеспечения мощности нагрузки не менее 1 кВт. Увеличение данной емкости позволяет расширить область допустимой работы, но при этом важно отметить рост массогабаритных показателей устройства.

Верификация результатов исследования проведена на экспериментальном силовом модуле, аналогичном по своему построению представленному ранее [11]. При практических экспериментах в работе КПППН также выявляются области как нормальной работы устройства, так и аномальной. Разница в определении границы области аномальной работы КПППН по сравнению с численно-аналитическим исследованием не превышает 10%.

#### Заключение

В результате проведенного исследования доказана возможность использования разработанной ранее численно-аналитической модели КПППН для анализа работы силовых преобразователей в составе высоковольтных систем электропитания с напряжением выходной шины 100 В. На основании модели возможно построение двухпараметрических бифуркационных диаграмм работы, что позволяет выявить области работы без возникновения субгармонических колебаний. Так, область допустимой работы КПППН с выходной мощностью, равной 1 кВт, находится при емкости выходного фильтра, превышающей 50 мФ, и коэффициенте усиления сигнала ошибки не более 30.

## Литература

1. Мэк Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению: пер. с англ. – М.: Изд дом «Додэка-XXI», 2008. – 272 с.
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
3. Hybrid buck-boost feedforward and reduced average inductor current techniques in fast line transient and high-efficiency buck-boost converter / P.-C. Huang, W.-Q. Wu, H.-H. Ho, K.-H. Chen // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. – Vol. 25, No. 3. – P. 719–730.
4. An on-chip high-speed current sensor applied in the current mode DC-DC converter / H. Wang, X. Hu, Q. Liu, G. Zhao, D. Luo // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – Vol. 29, No. 9. – P. 4479–4484.
5. Adaptive Peak-Inductor-Current-Controlled PFM Boost Converter With a Near-Threshold Startup Voltage and High Efficiency / H.-H. Wu, C.-L. Wei, Y.-C. Hsu, R.B. Darling // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – Vol. 30, No. 4. – P. 1956–1965.
6. Yan Y. Analysis and design of average current mode control using a describing-function-based equivalent circuit model / Y. Yan, F.C. Lee, P. Mattavelli // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28, No. 10. – P. 4732–4741.
7. Design of an average-current-mode noninverting buck-boost converter with reduced switching and conduction losses / C.-L. Wei, C.-H. Chen, K.-C. Wu, I.-T. Ko // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27, No. 12. – P. 4934–4943.
8. A Single-Inductor Multiple-output Auto-Buck-Boost DC-DC Converter With Autophase Allocation / Y. Zheng, M. Ho, J. Guo, K.-L. Mak, K.N. Leung // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2016. – Vol. 31, No. 3. – P. 2296–2313.
9. Апасов В.И. Исследование унифицированного силового модуля на основе комбинированного преобразователя напряжения // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева (Вестник СибГАУ). – 2016. – Т. 17, № 4. – С. 916–922.
10. Апасов В.И. Влияние коэффициента усиления сигнала ошибки звена обратной связи на характер работы комбинированного преобразователя / В.И. Апасов, Ю.А. Шурыгин // Доклады ТУСУР. – 2016. – № 3(19). – С. 123–127.
11. Апасов В.И. Разработка и исследование комбинированного понижающе-повышающего преобразователя для системы электроснабжения автоматического космического аппарата: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2018. – 160 с.
12. Emadi A. Vehicular electric power systems / A. Emadi, M. Ehsani, J.M. Miller – Land, sea, air and space vehicles. – New York : Marcel Dekker, 2004. – 504 p.
13. A New Buck-Boost Converter with low-Voltage Stress and Reduced Conducting Components / H.-S. Son, J.-K. Kim, J.-B. Lee, S.-S. Moon, J.-H. Park, S.-H. Lee // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 64, No. 9. – P. 7030–7038.
14. Wu F.-Y. Impact of PWM Duty Cycle Jitter on Switching-Mode Power Converter Efficiency / F.-Y. Wu, Y.-M. Chen // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2017. – Vol. 32, No. 11. – P. 8751–8762.
15. Chen J.-J. A high-efficiency positive buck-boost converter with mode-select circuit and feed-forward techniques / J.-J. Chen, P.-N. Shen, Y.-S. Hwang // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 28, No. 9. – P. 4240–4247.
16. Нелинейная динамика полупроводниковых преобразователей / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, А.И. Андриянов, С.Г. Михальченко. – Томск : Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 294 с.
17. Awrejcewicz J. Nonlinearity, bifurcation and chaos: Theory and applications / J. Awrejcewicz, P. Hagedorn. – Croatia: In TechOpen, 2012. – 355 p.
18. Dynamic Stability Analysis of Synchronverter-Dominated Microgrid Based on Bifurcation Theory / Z. Shuai, Y. Hu, Y. Peng, C. Tu, Z.J. Shen // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 64, No. 9. – P. 7467–7476.

**Апасов Владимир Иванович**

Вед. инженер-конструктор акционерного общества «Научно-производственный центр «Полус»  
Кирова пр., 56в, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 55-46-94  
Эл. почта: vovaap@mail.ru

**Кобзев Анатолий Васильевич**

Д-р техн. наук, профессор каф. промышленной электроники (ПрЭ) ТУСУР  
Вершинина ул., 74, г. Томск, Россия, 634045  
Тел.: +7 (382-2) 51-05-30  
Эл. почта: akobzev@ie.tusur.ru

**Михальченко Геннадий Яковлевич**

Д-р. техн. наук, профессор каф. ПрЭ ТУСУР  
Вершинина ул., 74, г. Томск, Россия, 634045  
Тел.: +7 (382-2) 41-32-32  
Эл. почта: kpe-tusur@yandex.ru

Apasov V.I., Kobzev A.V., Mikhalechenko G.Ya.  
**Study of the combined buck-boost DC-DC converter in the composition of high-voltage energy-converting equipment**

The article is devoted to the development of a numerical-analytical mathematical model of a combined buck-boost DC-DC converter for the analysis of its work as part of high-voltage energy-converting equipment. The scheme of the considered DC-DC converter, the ratings of the components of the power part of the device, ensuring the operation of the device for a load of not more than 1 kW, are given. The output voltage diagrams in various operating modes are shown, as well as two-parameter device bifurcation diagrams, which allow determining areas of normal operation of the device, characterized by minimal output voltage ripples and excluding the occurrence of subharmonic oscillations.

**Keywords:** combined buck-boost DC-DC converter, mathematical model, two-parameter bifurcation diagram, area of normal operation.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-89-94

*References*

1. Mek R.A. *Impulsnye istochniki pitaniya, teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu* [Switching power sources, theoretical design principles and practical application guidelines]. M., «Dodeka-XXI» Publ., 2008. 272 p. (in Russ.).
2. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tehnika* [The transistor converting technics]. Moscow, Technosphere Publ., 2006, 632 p. (in Russ.).

3. Huang P.-C., Wu W.-Q., Ho H.-H., Chen K.-H. Hybrid buck-boost feedforward and reduced average inductor current techniques in fast line transient and high-efficiency buck-boost converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 25, no. 3, pp. 719–730.
4. Wang H., Hu X., Liu Q., Zhao G., Luo D. An on-chip high-speed current sensor applied in the current mode DC-DC converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 9, pp. 4479–4484.
5. Wu H.-H., Wei C.-L., Hsu Y.-C., Darling R.B. Adaptive Peak-Inductor-Current-Controlled PFM Boost Converter With a Near-Threshold Startup Voltage and High Efficiency. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, no. 4, pp. 1956–1965.
6. Yan Y., Lee F.C., Mattavelli P. Analysis and design of average current mode control using a describing-function-based equivalent circuit model. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 28, no. 10, pp. 4732–4741.
7. Wei C.-L., Chen C.-H., Wu K.-C., Ko I.-T. Design of an average-current-mode noninverting buck-boost converter with reduced switching and conduction losses. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, no. 12, pp. 4934–4943.
8. Zheng Y., Ho M., Guo J., Mak K.-L., Leung K.N. A Single-Inductor Multiple-output Auto-Buck-Boost DC-DC Converter With Autophase Allocation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 3, pp. 2296–2313.
9. Apasov V.I. Study of unified power unit based on combined voltage converter. *Vestnik SibGAU*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 916–922 (in Russ.).
10. Apasov V.I., Shurygin Y.A. The effect of the gain of the feedback link error signal on the operation of the combined converter. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 123–127 (in Russ.).
11. Apasov V.I. Razrabotka i issledovaniya kombinirovannogo ponigaushhe-povyshayushhego preobrazovatelya dlya sistemy elektrosnabgeniya avtomaticheskogo kosmicheskogo apparata. Dissertation kand. nauk [Development and research of a combined buck-boost converter for the power supply system of an automatic spacecraft. Dissertation PhD]. Tomsk, 2018. 160 p. (in Russ.).
12. Emadi A., Ehsani M., Miller J.M. Vehicular electric power systems – Land, sea, air, and space vehicles. Marcel Dekker, New York, 2004, 504 p.
13. Son H.-S., Kim J.-K., Lee J.-B., Moon S.-S., Park J.-H., Lee S.-H. A New Buck-Boost Converter with low-Voltage Stress and Reduced Conducting Components. *Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 9, pp. 7030–7038.
14. Wu F.-Y., Chen Y.-M. Impact of PWM Duty Cycle Jitter on Switching-Mode Power Converter Efficiency. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 11, pp. 8751–8762.
15. Chen J.-J., Shen P.-N., Hwang Y.-S. A high-efficiency positive buck-boost converter with mode-select circuit and feed-forward techniques. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 28, no. 9, pp. 4240–4247.
16. Kobzev A.V., Mihalchenko G.J., Mihalchenko S.G., Andriyanov A.I. Nelinyanaya dinamika poluprovodnikovyyh preobrazovatelyey [Nonlinear dynamics of semi-conductor converters]. Tomsk, Publ. Tomsk state university of control systems and radioelectronics, 2007, 224 p. (in Russ.).
17. Awrejcewicz J., Hagedorn P. Nonlinearity, bifurcation and chaos. Theory and applications. Croatia, 2012, p. 355.
18. Shuai Z., Hu Y., Peng Y., Tu C., Shen Z.J. Dynamic Stability Analysis of Synchronverter-Dominated Microgrid Based on Bifurcation Theory. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 9, pp. 7467–7476.

---

**Vladimir I. Apasov**

Engineer-designer Stock Company  
«Scientific & Industrial Centre «Polyus»  
56v, Kirova pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 55-46-94  
Email: vovaap@mail.ru

**Anatoliy V. Kobzev**

Doctor of Engineering, professor,  
Department of Industrial Electronics, Tomsk State  
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
74g, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045  
Phone: +7 (382-2) 51-05-30  
Email: akobzev@ie.tusur.ru

**Gennadiy Ya. Mihalchenko**

Doctor of Engineering, professor,  
Department of Industrial Electronics TUSUR  
74g, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045  
Phone: +7 (382-2) 41-32-32  
Email: kpe-tusur@yandex.ru

УДК 621.355: 519.713

А.А. Брянцев, В.Г. Букреев

## Алгоритм определения параметров модели Шеферда для построения имитатора литий-ионного аккумулятора

Предлагаются методика и алгоритм определения параметров модели Шеферда для описания нелинейной вольт-амперной характеристики заряда литий-ионного аккумулятора. Результаты моделирования отражают достаточно высокую адекватность алгоритма на тестовом примере в программной среде Simulink Matlab. Подтверждается возможность использования разработанного алгоритма при исследовании режима разряда аккумулятора.

**Ключевые слова:** модель заряда литий-ионного аккумулятора, модель Шеферда, алгоритм определения параметров модели аккумулятора.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-95-99

Применение литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) в космической технике обуславливает создание специализированных устройств – имитаторов ЛИАБ (ИЛИАБ) с целью тестирования режимов работы преобразующей аппаратуры системы электропитания. Для повышения качества и сокращения времени отработки и испытаний применяются современные методы физического, имитационного и компьютерного моделирования [1, 2].

В данный момент промышленно выпускаемые ИЛИАБ не обеспечивают полностью функциональную реализацию алгоритмов, позволяющих с требуемой точностью воспроизвести основные характеристики батареи. В первую очередь это связано с отсутствием имитации режимов заряда аккумулятора в составе имитатора ЛИАБ.

Предлагается построение ИЛИАБ (рис. 1), который реализован из имитаторов литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) [3]. Данная концепция позволяет расширить функциональное наполнение имитатора всей ЛИАБ и исследовать ее характеристики.

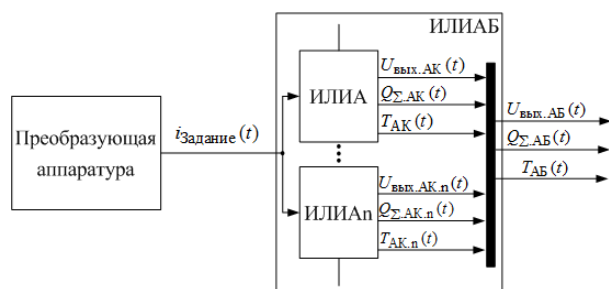


Рис. 1. Структурная схема реализации ИЛИАБ для отработки режимов работы преобразующей аппаратуры

В статье рассмотрена модель ЛИА, основанная на уравнении Шеферда, позволяющая формировать статические характеристики в аккумуляторе при изменении тока  $i_{\text{Задание}}(t)$ , поступающего с тестируемого электрооборудования.

### Описание методики определения параметров модели ЛИА

Для реализации имитатора ЛИА рассмотрены математические модели [4, 5]. Представлены варианты описания ЛИА при помощи эквивалентных электрических схем замещения [6, 7].

Моделью ЛИА является модель выходного  $U_{\text{Вых}}(t)$  напряжения [8, 9] и составляется по схеме замещения (рис. 2) и описывается уравнением:

$$U_{\text{Вых}}(t) = E(t) + R_0 \cdot i(t), \quad (1)$$

где  $E(t)$  – ЭДС аккумулятора, В;  $i(t)$  – ток заряда-разряда аккумулятора, А;  $R_0$  – постоянное сопротивление, Ом.

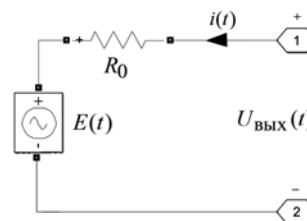


Рис. 2. Схема замещения аккумулятора по модели Шеферда

Более точной моделью ЛИА, описывающей процессы в аккумуляторе при изменении зарядно-разрядного тока, является модель Шеферда [10, 11]. Данное уравнение в режиме заряда аккумулятора выглядит следующим образом:

$$U_{\text{Вых}}(t) = E_0 - K \frac{Q_{\text{Max}}}{Q_{\text{Max}} - Q_{\Sigma}(t)} + A \cdot e^{(-B \cdot Q_{\Sigma}(t))} + R_0 \cdot i(t), \quad (2)$$

где  $E_0$  – максимальное напряжение аккумулятора, В;  $i(t)$  – измеренный ток заряда аккумулятора, А;  $R_0$  – постоянное сопротивление, Ом;  $K$  – поляризационная составляющая, В;  $A$  – экспоненциальная составляющая, А·ч<sup>-1</sup>;  $B$  – инверсная экспоненциальная составляющая, А·ч<sup>-1</sup>;  $Q_{\text{Max}}$  – полная емкость аккумулятора, А·ч;  $Q_{\text{Exp}}$  – экспоненциальная емкость аккумулятора, А·ч;  $Q_{\Sigma}(t)$  – заряд, полученный аккумулятором за время  $t$ , А·ч.

Для определения значений параметров в выражении (2) необходимо воспользоваться данными производителя ЛИА (рис. 3) [12, 13]:

$$A = U_{\text{Full}} - U_{\text{Exp}}, \quad (3)$$

$$B = \frac{3}{Q_{\text{Exp}}}, \quad (4)$$

$$K = \frac{(U_{\text{Full}} - U_{\text{Nom}} + A(\exp(-B \cdot Q_{\text{Nom}}) - 1)) \cdot (Q_{\text{Max}} - Q_{\text{Nom}})}{Q_{\text{Nom}}}, \quad (5)$$



$$R_0 = U_{Nom} \cdot \frac{1 - \eta}{0,2 \cdot Q_{Nom}}, \quad (6)$$

$$E_0 = U_{Full} + K - A + R_0 \cdot i^*, \quad (7)$$

$$Q_{\Sigma}(t) = Q_{Exp} - \int_{t_0}^t i(t) dt, \quad (8)$$

где  $U_{Full}$  – максимально допустимое напряжение аккумулятора, представленное производителем, В;  $U_{Exp}$  – экспоненциальное напряжение аккумулятора, В;  $U_{Nom}$  – номинальное напряжение аккумулятора, В;  $Q_{Nom}$  – номинальная емкость аккумулятора, А·ч;  $Q_{Min}$  – минимальная емкость аккумулятора, А·ч;  $\eta$  – КПД аккумулятора, %;  $i^*$  – фиксированный ток заряда аккумулятора, А.

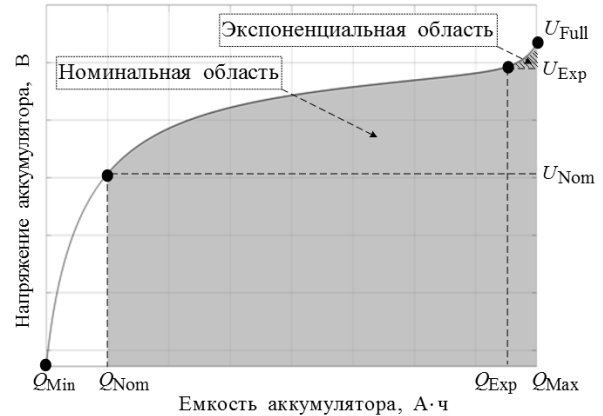


Рис. 3. График зависимости напряжения аккумулятора от емкости в режиме заряда

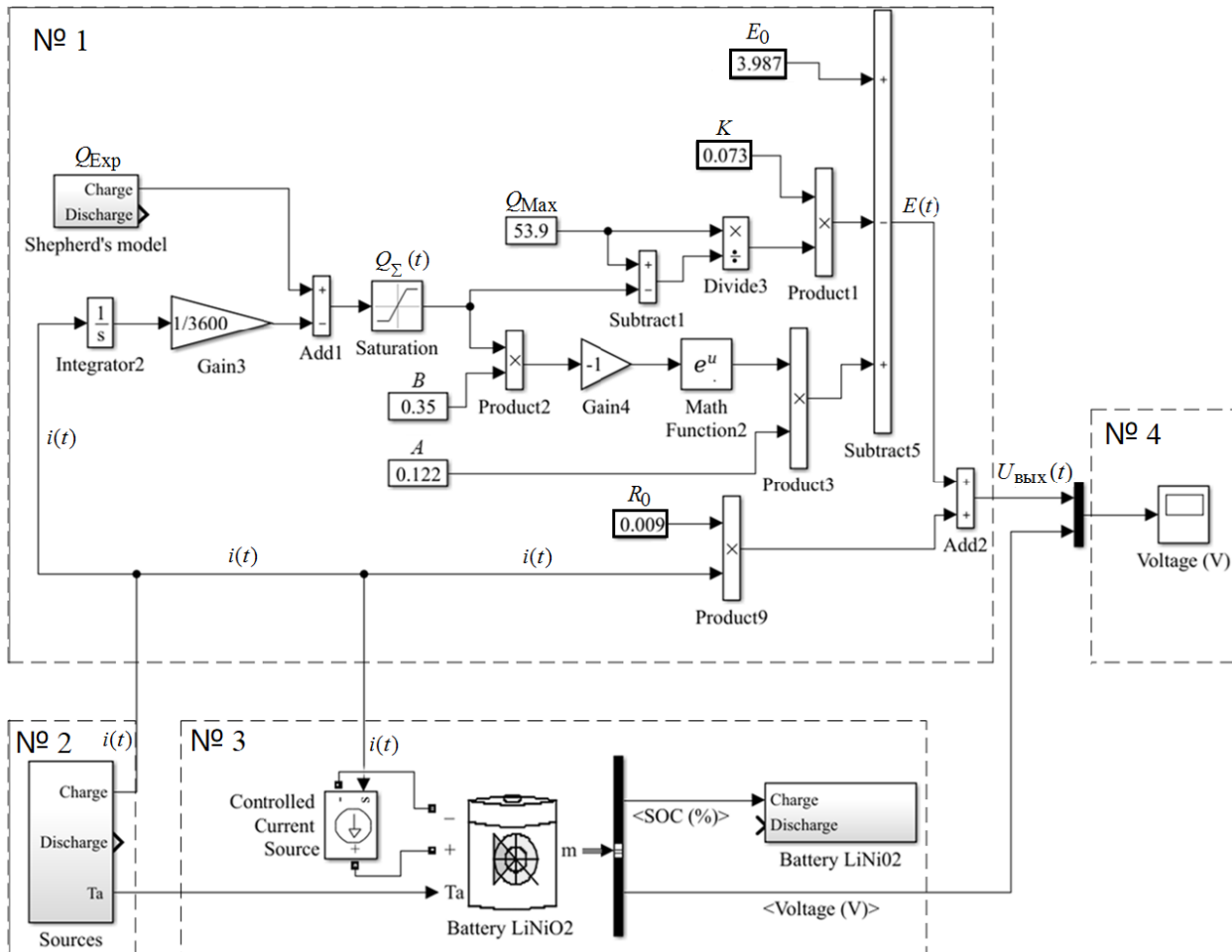


Рис. 4. Имитационная модель Шеффера и эталонного аккумулятора в среде Simulink Matlab:

блок № 1 – реализация системы уравнения (2) модели Шеффера;

блок № 2 – реализация преобразующей аппаратуры тока задания  $i_{\text{заданне}}(t)$ ;

блок № 3 – реализация эталонной модели LiNiO<sub>2</sub>;

блок № 4 – реализация визуализации зависимости напряжения аккумулятора от времени

**Описание имитационной модели ЛИА в среде Simulink Matlab**

Программный пакет Simulink Matlab оснащен встроенной моделью аккумулятора, позволяющей имитировать поведение литий-ионного аккумулятора. Эту модель будем использовать в качестве эталонной модели LiNiO<sub>2</sub> (далее – имитационная модель

LiNiO<sub>2</sub>) [14, 15], с которой будем сравнивать построенную модель Шеффера. Для построения структуры «модель Шеффера – имитационная модель LiNiO<sub>2</sub> – система управления – система визуализации» (рис. 4) воспользуемся компонентами пакета «Simulink Library Browser». Входные и выходные сигналы данной структуры являются информационными.

Система уравнений (2) задается в виде соответствующих моделирующих компонентов блоком № 1. Задание требуемых значений протекающего тока осуществляется блоком № 2, настроенного на формирование постоянного номинального тока  $\pm 4,5$  А.

После определения параметров модели Шеферда проверяется ее адекватность в результате сравнения соответствующих характеристик, полученных на имитационной модели  $\text{LiNiO}_2$  блоком № 3.

На рис. 5 и 6 представлены графики зависимости напряжения аккумулятора от времени блоком № 4, вычисленные на имитационной модели  $\text{LiNiO}_2$  (сплошная линия) и по модели Шеферда (пунктирная линия).

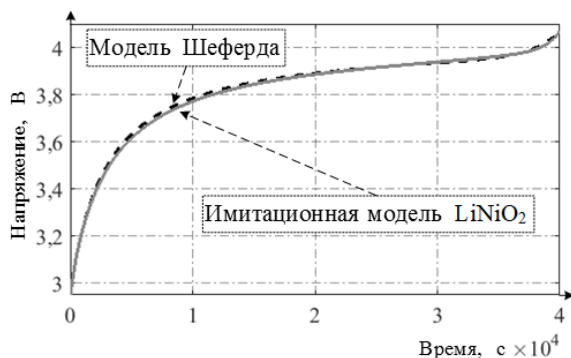


Рис. 5. График зависимости напряжения аккумулятора от времени в режиме заряда

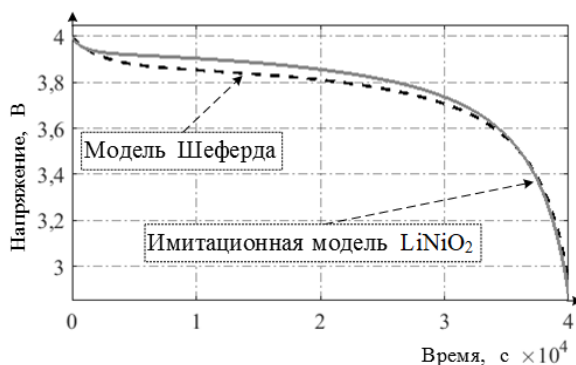


Рис. 6. График зависимости напряжения аккумулятора от времени в режиме разряда

В результате моделирования установлено, что погрешность напряжения ЛИА по модели Шеферда не превышает  $\pm 1\%$  с имитационной моделью  $\text{LiNiO}_2$  практически на всей зарядной и разрядной характеристике (см. графики на рис. 5 и 6). Но имитационная модель  $\text{LiNiO}_2$  имеет погрешность до  $\pm 5\%$  по сравнению с экспериментом при токах, численно равных пятикратной величине емкости ( $5Q_{\text{Max}}$ ) [16].

### Алгоритм определения параметров модели Шеферда

Алгоритм позволяет определить параметры модели Шеферда как в режиме заряда, так и разряда аккумулятора и иллюстрируется блок-схемой, представленный на рис. 7.

Данный алгоритм строится на основе данных, представленных производителями ЛИА или сформированных экспериментальным путем (см.рис. 2).

Коэффициенты модели рассчитываются по формулам (3)–(7), определяется направление тока  $i(t)$  для построения модели заряда или разряда.

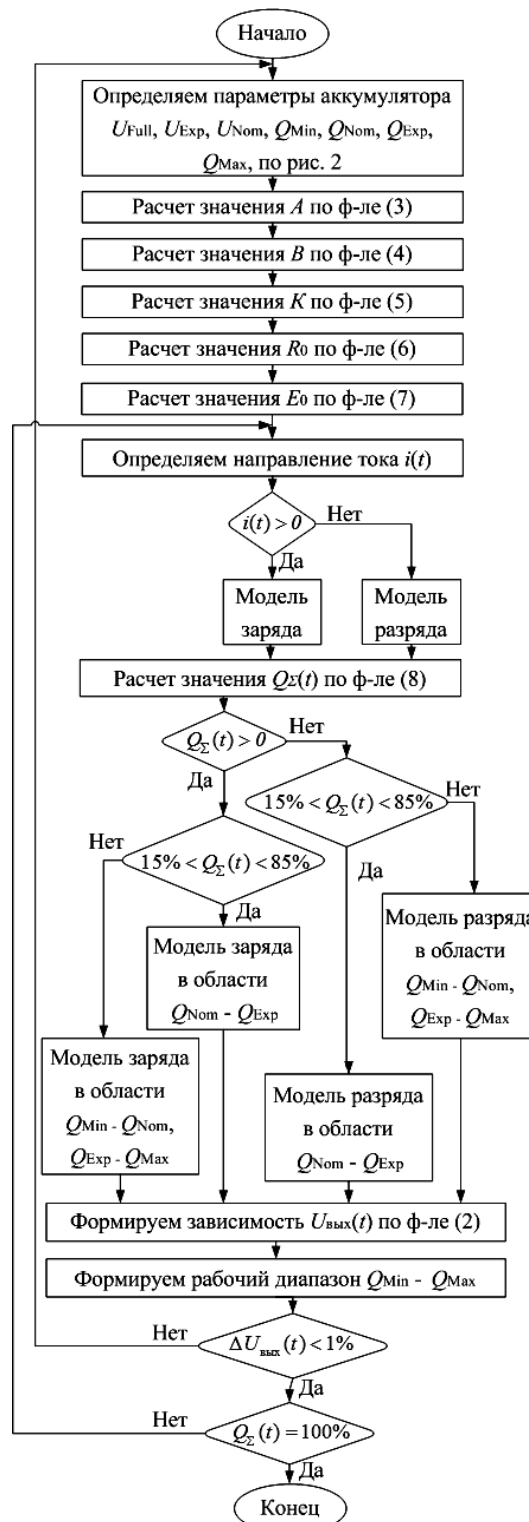


Рис. 7. Алгоритм определения параметров модели Шеферда

Далее рассчитывается  $Q_{\Sigma}(t)$  по формуле (8), определяется область  $Q_{\Sigma}(t)$  для формирования зависимости  $U_{\text{вых}}(t)$  по уравнению (2). Определяем  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$ , проводим проверку данных, используемых

для построения  $U_{\text{вых}}(t)$ . Если значение  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  находится в допустимых пределах  $<1\%$ , то продолжаем формировать  $U_{\text{вых}}(t)$ , если не удовлетворяет требованиям – возвращаемся в начало алгоритма и корректируем значения  $U_{\text{Nom}}$ ,  $U_{\text{Exp}}$ ,  $Q_{\text{Nom}}$ ,  $Q_{\text{Exp}}$ . Повторяем всю процедуру с самого начала и формируем зависимость  $U_{\text{вых}}(t)$  до тех пор, пока не заполнится счетчик ампер-часов  $Q_{\Sigma}(t)$  аккумулятора.

#### Заключение

Алгоритм определения параметров модели Шеферда и непосредственно сама модель были проверены на тестовых примерах при помощи программы Simulink Matlab. Максимальная погрешность предложенной модели ЛИА не превышает  $\pm 1\%$  с имитационной моделью  $\text{LiNiO}_2$  на всей зарядной и разрядной характеристике аккумулятора.

Представленный алгоритм позволяет решить основные проблемы, возникающие при разработке имитаторов ЛИАБ, а именно определение параметров модели каждого аккумулятора и построение его зарядной и разрядной характеристик.

#### Литература

1. He H. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models For State of Charge Estimation by an Experimental Approach / H. He, R. Xiong, J. Fan // *Energies*. – 2011. – No. 4. – P. 582–598.
2. He H. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles / H. He, R. Xiong, H. Guo, S. Li // *Energies*. – 2012. – P. 113–121.
3. Имитатор литий-ионного аккумулятора с рекуперацией энергии / А.А. Брянцев, А.Н. Ильин, Л.А. Качин, В.Г. Букреев // *Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. трудов НПЦ «Полус»*. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2016. – С. 136–138.
4. Ramadesigan V. Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2012. – Vol. 159, No. 3. – P. 31–45.
5. Li S. Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented S. Li, B. Ke // *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. – 2011. – P. 1–8.
6. Distributed MPC for efficient coordination of storage and renewable energy sources across control areas / K. Baker, J. Guo, G. Hug, X. Li // *IEEE Transaction on Smart Grid*. – 2016. – Vol. 7. – P. 992–1001.
7. Zhao C. Optimal home energy management system with mixed types of loads / C. Zhao, S. Dong, F. Li, Y. Song // *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. – 2015. – Vol. 1. – P. 29–37.
8. Tremblay O. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications / O. Tremblay, A. Dessaint // *Electric Vehicle Journal*. – 2009. – Vol. 3. – P. 289–298.
9. Tremblay O. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles / O. Tremblay, A. Dessaint, I. Dekkiche // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* – 2007. – P. 284–289.
10. Shepherd M. Design of Primary and Secondary Cells. – Part 2. An equation describing battery discharge // *Journal of Electrochemical Society*. – 1965. – Vol. 112. – P. 657–664.
11. Mauracher P. Dynamic modelling of lead/acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification / P. Mauracher, E. Karden // *Journal of Power Sources*. – 1997. – Vol. 67. – P. 69–84.
12. Baker K. Modeling Stationary Lithium-Ion Batteries for Optimization and Predictive Control / K. Baker, Y. Shi, D. Christensen // *IEEE Power and Energy Conference Champlain*. – 2017. – P. 1–7.
13. Tremblay O. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles // *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. – 2007. – P. 284–289.
14. Rechargeable lithium-ion battery VL 48 E – high energy space cell // *DataSheet*. – Doc. No. 54058-2-0907–2007.
15. Xi J. Optimal energy management strategy for battery powered electric vehicles / J. Xi, M. Li, M. Xu // *Applied Energy*. – 2014. – P. 332–341.
16. Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model / N. Omar, M. A. Monem, Y. Firouz et al. // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 113. – P. 1575–1585.

#### Брянцев Андрей Анатольевич

Аспирант Инженерной школы энергетики  
Национального политехнического университета (НИ ТПУ)  
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-923-421-11-93  
Эл. почта: aa\_bryantsev@mail.ru

#### Букреев Виктор Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор  
Инженерной школы энергетики НИ ТПУ  
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>  
Тел.: +7-913-854-21-96  
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

Bryantsev A.A., Bukreev V.G.

#### Shepherd algorithm to determine model parameters when constructing simulator of the Lithium-Ion cells

The article proposes a technique and an algorithm to determine the parameters of Shepherd model used to describe the nonlinear current-voltage characteristics of the charge a lithium-ion cells. The simulation results reflect a fairly high adequacy of the algorithm on a test example in Simulink Matlab software environment. The possibility of using the developed algorithm in the study of discharge cell is confirmed.

**Keywords:** lithium-ion cell charge model, Shepherd model, algorithm to determine cell model parameters

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-95-99

#### References

1. He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models For State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*, 2011, no. 4, pp. 582–598.
2. He H., Xiong R., Guo H., Li S. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles. *Energies*, 2012, pp. 113–121.
3. Bryantsev A.A., Ilin A.N., Kachin L. A., Bukreev V.G. Simulator Lithium-Ion Batteries with Recovery Energy. *Electronic and electromechanical systems and devices: Proc. of scient. papers SRC «Polus», Tomsk, 2016*, pp. 136–138 (in Russ.).

4. Ramadesigan V. Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective. *Journal of The Electrochemical Society*, 2012, vol. 159, no. 3, pp. 31–45.
5. Li S., Ke B. Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–8.
6. Baker K., Guo J., Hug G., Li X. Distributed MPC for efficient coordination of storage and renewable energy sources across control areas. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2016, vol. 7, pp. 992–1001.
7. Zhao C., Dong S., Li F., Song Y. Optimal home energy management system with mixed types of loads. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2015, vol. 1, pp. 29–37.
8. Tremblay O., Dessaint A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *Electric Vehicle Journal*, 2009, vol. 3, pp. 289–298.
9. Tremblay O., Dessaint A., Dekkiche I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, pp. 284–289.
10. Shepherd M. Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An equation describing battery discharge. *Journal of Electrochemical Society*, 1965, vol. 112, pp. 657–664.
11. Mauracher P., Karden E. Dynamic modelling of lead/acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification. *Journal of Power Sources*, 1997, vol. 67, pp. 69–84.
12. Baker K., Shi Y., Christensen D. Modeling Stationary Lithium-Ion Batteries for Optimization and Predictive Control. *IEEE Power and Energy Conference Champaign*, 2017, pp. 1–7.
13. Tremblay Olivier. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2007, pp. 284–289.
14. Rechargeable lithium-ion battery VL 48 E – high energy space cell. *DataSheet*, Doc no. 54058-2-0907–2007.
15. Xi J., Li M., Xu M. Optimal energy management strategy for battery powered electric vehicles. *Appl. Energy*, 2014, pp. 332–341.
16. Omar N., Monem M.A., Firouz Y. et al. Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model. *Applied Energy*, 2014, vol. 113, pp. 1575–1585.

---

**Andrey A. Bryantsev**

PhD student, School of Energy & Power Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University (TPU)  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-923-421-11-93  
Email: aa\_bryantsev@mail.ru

**Viktor G. Bukreev**

Doctor of Engineering, Professor,  
School of Energy & Power Engineering, TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>  
Phone: +7-913-854-21-96  
Email: bukreev@tpu.ru

# 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](http://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;  $\sin x(t_1)$ ;  $U_{in}$ ;  $I_{вх}$ ;  $T_z$ ;  $\beta_2$ ;  $H_2O$ , Adobe Acrobat, Cisco и т.д.); векторные величины – жирным, прямо (не курсив) –  $A_1$ ,  $M(f)$ ,  $\beta_x$ . Шаблоны для набора формул необходимо взять на сайте из шаблона статьи.

7. Все употребляемые обозначения и сокращения должны быть пояснены.

8. Единицы измерения физических величин должны соответствовать Международной системе единиц (СИ) и написаны по-русски через пробел (х, ГГц; 20 ГГц;  $T$ , град;  $7^\circ C$ ). Десятичные числа пишутся через запятую (не точку).

9. Таблицы и рисунки должны иметь тематические заголовки (не повторяющие фразы-ссылки на них в тексте). (Рис. 1. Название рисунка; Таблица 1. Название таблицы). Большие блоки расшифровки

условных обозначений лучше приводить в тексте. Подписи и надписи на рис. – Times New Roman, 9 пт (после масштабирования), не жирным, не курсивом, переменные – также как и в тексте. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте (... на рис. 3, ... в табл. 2).

10. Рисунки и фотографии должны быть **черно-белыми**, четкими, контрастными, аккуратными, сгруппированными. Графики – не жирно, сетка – четко. Единицы измерения – на русском. Десятичная запятая (не точка). Рисунки могут быть выполнены в программах CorelDraw, Illustrator, Word, Visio и должны давать возможность внесения исправлений.

11. Иллюстрации, должны быть разрешением не менее 600 dpi. Масштаб изображения – 8 или 16,7 см по ширине (при условии читаемости всех надписей, выполненных шрифтом Times New Roman, после масштабирования – 9 кегль).

12. На все источники, указанные в списке литературы, должны быть ссылки по тексту (нумерация в порядке упоминания, например, [1, 2], [5–7]). Описание источников должно соответствовать ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008 и содержать всю необходимую для идентификации источника информацию, а именно: для *непериодических изданий* – фамилию и инициалы автора, полное название работы, место издания, название издательства, год издания, количество страниц; для *периодических изданий* – фамилию, инициалы автора, полное название работы, название журнала, год выпуска, том, номер, номера страниц (см. примеры оформления библиографий).

Бумажный вариант рукописи статьи должен быть подписан авторами и (для сторонних авторов) иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Материальные претензии авторов, связанные с распространением материалов их статей после опубликования, не принимаются.

Авторы несут полную ответственность за содержание статей и за последствия, связанные с их публикацией.

## Контактная информация

Адрес: 634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Эл. почта: [vnmas@tusur.ru](mailto:vnmas@tusur.ru). Тел.: +7 (382-2) 51-21-21

