

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442



# ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники

2022 • Том 25, № 3



9 771818 044708 02007



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ  
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
2022, том 25, № 3**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

**Редакционная коллегия**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Ю.Н. Кульчин**, д.ф.-м.н., академик РАН, научный руководитель, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия.

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

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

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

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

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

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

**А.Р. Сафин**, к.т.н., доц., НИУ «МЭИ», Москва, Россия.

**П.Е. Троян**, д.т.н., зав. каф. физической электроники, ТУСУР, почётный работник высшего профессионального образования РФ, почётный работник науки и техники РФ, Томск, Россия.

**И.А. Ходашинский**, д.т.н., проф., каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа, вед. науч. сотрудник лаб. медико-биологических исследований (ЛМБИ), Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-9355-7638>.

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

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

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

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

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

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

**Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники**

634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел. (382-2) 51-21-21.

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

Корректор В.Г. Лихачева.

Подписано в печать 25.09.2022. Формат 60×84 1/8. Печ. л. 5,7. Тираж 500. Заказ 10.

---

**Editorial board**

- Viktor M. Rulevskiy** Editor in Chief, Rector of TUSUR University, Scientific adviser at the Research Institute of Automation and Electromechanics (RI AEM) TUSUR, Doctor of Engineering.
- Alexander A. Shelupanov** Deputy Editor in Chief, President of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor, Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Laureate of the Russian Federation Government Prize in Education, Twice Laureate of the Russian Federation Government Prize in Science and Technology, Tomsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2393-6701>.
- Anton G. Loschilov** Deputy Editor in Chief, Vice-Rector for Research and Innovations of TUSUR University, Head of the Department of design of components and parts of electronic equipment, TUSUR University, Candidate of Engineering.
- Viktor N. Maslennikov** Executive Secretary of the Editor's Office, Candidate of Engineering.
- Mikhail P. Batura** Chief Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), Doctor of Engineering, Professor.
- Boris A. Belyaev** Head of the Electrodynamics Department, Institute of Physics SB RAS (Krasnoyarsk), Doctor of Engineering.
- Ian G. Brown** PhD in Plasma Physics, Lawrence Berkeley National Laboratories (California USA).
- Sergei A. Gavrilov** Vice Rector for Research, National Research University of Electronic Technology (MIET, Moscow), Doctor of Engineering, Professor.
- Yury P. Ekhlakov** Professor, Department of Data Processing Automation, TUSUR University, Doctor of Engineering.
- Vyacheslav M. Isaev** First Deputy Director, Mytishchi Research Institute of Radio Measurement Instruments, Doctor of Engineering.
- Gennady A. Kobzev** Vice-Rector for International Cooperation, TUSUR University, Candidate of Engineering.
- Anatoly M. Korikov** Professor, Department of Automated Control Systems of TUSUR University, Doctor of Engineering.
- Yury N. Kulchin** Scientific Director, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok), Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics.
- Vazgen Sh. Melikyan** Director, Academic Department of Synopsis Armenia (Yerevan, Armenia), Correspondent Member of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Engineering, Professor.
- Sergey D. Odintsov** International Member of the Norwegian Academy of Science and Letters, Professor, Institute of Space Sciences, Barcelona, Spain, Doctor of Physics and Mathematics.
- Yefim M. Oks** Head of the Department of Physics, TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
- Eduard D. Pavlygin** First Deputy General Director for Research of Federal Research-and-Production Center JSC R&P Mars, Candidate of Engineering.
- Nikolay A. Ratakhin** Director's Advisor of Institute of High Current Electronics SB RAS, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics.
- Vilyam K. Saryan** Scientific Adviser at the Research Institute of Radio (Moscow), Academician of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Engineering, Professor.
- Ansar R. Safin** Associate Professor, Department of Formation and Processing of Radio Signals, National Research University MPEI (Moscow), Candidate of Engineering.
- Pavel E. Troyan** Vice-Rector for Academic Affairs, Head of Department of Physical Electronics, Doctor of Engineering, Professor.
- Ilya A. Hodashinsky** Professor, Department of Complex Information Security of Computer Systems, TUSUR University, Leading Researcher at Laboratory of Medical and Biological Studies (LBMS), Tomsk, Russia, Doctor of Engineering.
- Vladimir V. Shaidurov** Director, Institute of Computational Modeling SB RAS (Krasnoyarsk), Correspondent Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
- Stanislav M. Shandarov** Head, Department of Electronic Devices, TUSUR University, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
- Yury A. Shurygin** First Vice-Rector of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.

## Содержание

## ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

<b>Шевченко Г.М., Семенов Э.В.</b> Неквасистатическая модель переходных процессов в прямосмещенном $p-n$ -переходе .....	7
<b>Суровцев Р.С., Скорняков И.А., Карри С.</b> Миниатюризация устройства на основе витка меандровой линии с помощью дополнительных заземленных проводников .....	14
<b>Шурыгин Ю.А., Иштуткин С.В., Ширяев Б.В., Жидик Ю.С.</b> Изготовление электрооптических модуляторов на основе InP для ВОЛС и проведение автоматизированного визуального контроля их поверхности на предмет наличия дефектов .....	21
<b>Храмцов М.В., Заблоцкий А.М.</b> Устройства подогрева электронной компонентной базы радиоэлектронной аппаратуры в условиях отрицательных температур.....	28

## УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

<b>Куртукова А.В., Романов А.С., Федотова А.М., Шелупанов А.А.</b> Архитектура интеллектуальной системы для идентификации автора исходного кода .....	39
<b>Новохрестова Д.И., Костюченко Е.Ю., Ходашинский И.А.</b> Алгоритм и методика количественной оценки схожести речевых сигналов.....	45
<b>Змеев Д.О., Змеев О.А., Иванова Л.С., Фрейдин В.И.</b> Разработка подсистемы работы с байесовскими сетями для системы поддержки принятия решений в управлении проектами по разработке программного обеспечения.....	52
<b>Захарова А.А., Мезюха Н.В.</b> Информационная система сбора и анализа требований рынка труда для профессиональной подготовки и трудоустройства населения моногорода.....	57
<b>Грибанова Е.Б., Мустакимов Р.Р.</b> Разработка алгоритма решения обратной задачи формирования прибыли при ограничении целочисленности.....	63
<b>Завьялов В.М., Бевз Д.В.</b> Разработка и исследование быстродействующих нелинейных регуляторов для синхронных двигателей с постоянными магнитами.....	69

## СООБЩЕНИЯ

<b>Тюньков А.В., Золотухин Д.Б., Юшков Ю.Г., Казаков А.В.</b> Ионно-плазменное травление, инициированное электронным пучком.....	79
<b>Чан В.Т., Климов А.С., Зенин А.А.</b> Формирование покрытий на основе $Al_2O_3$ на полипропилене электронно-лучевым методом в форвакуумной области давлений.....	85
<b>Требования</b> .....	90

---

**ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS**

<b>Shevchenko G.M., Semyonov E.V.</b> Non-quasi-static model of transient processes in a forward-biased $p-n$ -junction .....	7
<b>Surovtsev R.S., Skorniyakov I.A., Karri S.</b> Propagation of ultrashort pulse in a model of a turn of a microstrip line folded into a meander with guard conductors .....	14
<b>Shurygin Yu.A., Ishutkin S.V., Shiryaev B.V., Zhidik Y.S.</b> Manufacture of InP-based electro-optical modulators for FOCL and automated visual inspection of their surface for defects .....	21
<b>Khramtsov M.V., Zabolotsky A.M.</b> Devices for heating the electronic component base of radio-electronic equipment in conditions of negative temperatures .....	28

**CONTROL, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS**

<b>Kurtukova A.V., Romanov A.S., Fedotova A.M., Shelupanov A.A.</b> Intelligent System Architecture for Identification of the Source Code Author .....	39
<b>Novokhrestova D.I., Kostyuchenko E.Y., Hodashinsky I.A.</b> Algorithm and method for quantitative assessment of the speech signals similarity .....	45
<b>Zmeev D.O., Zmeev O.A., Ivanova L.S., Freydin V.I.</b> Development of a subsystem to use Bayesian networks in a decision support system for software development management .....	52
<b>Zakharova A.A., Meziukha N.V.</b> Information system of collection and analysis the requirements of the labor market to employ the population of a monotown .....	57
<b>Gribanova E.B., Mustakimov R.R.</b> Development of an algorithm for solving the inverse problem of profit formation with an integer constraint .....	63
<b>Zavyalov V.M., Bevz D.V.</b> Development and study of PMSM nonlinear controllers providing quick response and electromagnetic torque accurate control .....	69

**MESSAGES**

<b>Tyunkov A.V., Zolotukhin D.B., Yushkov Yu.G., Kazakov A.V.</b> Ion-plasma etching initiated by the appearance of a beam .....	79
<b>Tran V.T., Klimov A.S., Zenin A.A.</b> Formation of Coatings Based on $Al_2O_3$ on Polypropylene by the Electron-Beam Method in the Forevacuum Pressure Region .....	85
<b>Manuscript requirements</b> .....	90

**ЭЛЕКТРОНИКА,  
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**



УДК 621.382.2

Г.М. Шевченко, Э.В. Семенов

## Неквазистатическая модель переходных процессов в прямосмещенном $p-n$ -переходе

Продемонстрирован выброс напряжения в начале переходной характеристики при прямосмещенном  $p-n$ -переходе, возникающий из-за зависимости последовательного сопротивления потерь от диффузионного заряда. Показано, что современные SPICE-модели  $p-n$ -переходов не позволяют описывать этот выброс в связи с тем, что последовательное сопротивление считается независимым от заряда, а накопленный диффузионный заряд рассчитывается в квазистатическом приближении. Предложена неквазистатическая модель переходных процессов в прямосмещенном  $p-n$ -переходе, корректно описывающая выброс на переходной характеристике прямого восстановления. Предложенная модель включает в себя только распространенные квазистатические элементы систем автоматизированного проектирования, что делает ее доступной для реализации на пользовательском уровне.

**Ключевые слова:**  $p-n$ -переход, прямое восстановление, последовательное сопротивление потерь, диффузионный заряд, неквазистатическая модель.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-7-13

Моделирование является одним из основных этапов при разработке радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Адекватное моделирование сводит к минимуму время и стоимость процесса разработки РЭА, а также позволяет получать достоверные результаты исследования разработанного устройства.

В радиоэлектронике среди используемой при проектировании электронной компонентной базы широко распространены полупроводниковые приборы с  $p-n$ -переходом. Например, быстро восстанавливающиеся диоды, диоды с накоплением заряда, биполярные и IGBT-транзисторы и т.д.

При формировании положительного потенциала на области  $p$ -типа относительно области  $n$ -типа (прямое восстановление), в начале переходной характеристики  $p-n$ -перехода наблюдается выброс напряжения. Длительность выброса может составлять несколько сот нс, поэтому его невозможно объяснить индуктивностью исследуемого объекта. Возникновение выброса объясняется зависимостью последовательного сопротивления диода от накопленного в нем диффузионного заряда [1, 2]. В начале процесса прямого восстановления диффузионный заряд мал (количество свободных носителей заряда относительно мало), что соответствует большому значению последовательного сопротивления потерь и большому падению напряжения на  $p-n$ -переходе. При открывании  $p-n$ -перехода зарядов становится больше. Чем больше свободных носителей заряда в  $p$ - и  $n$ -областях, тем меньше последовательное сопротивление и наоборот.

Актуальность адекватного моделирования динамических процессов в полупроводниковых приборах в настоящее время возрастает [3, 4] по причине сокращения длительности рабочих сигналов в различных радиотехнических системах. Особую актуальность правильное моделирование выброса при открывании диодов имеет для разработки защитных устройств [5].

В источниках [1, 2] предложено описывать зависимость сопротивления пассивных областей диода от заряда по следующей формуле:

$$R_S(Q_d) = \frac{1}{Y_0 + \alpha Q_d}, \quad (1)$$

где  $Q_d$  – диффузионный заряд,  $Y_0$  – проводимость пассивных областей при нулевом токе,  $\alpha$  – параметр, зависящий от геометрии диода и процессов изготовления, которым подвергался диод.

Недостаток формулы (1) заключается в том, что она получена фактически в предположении одинаковой плотности диффузионного заряда во всей базовой области диода. Действительно, при увеличении диффузионного заряда последовательное сопротивление потерь в соответствии с (1) неограниченно уменьшается. В реальности при удалении от  $p-n$ -перехода плотность диффузионного заряда уменьшается, в связи с чем образуется часть последовательного сопротивления потерь, которая от тока диода (диффузионного заряда) практически не зависит. Это явление особенно заметно при большой толщине базы.

В свою очередь, диффузионный заряд в (1) зависит от тока электропроводности через диод [6–9]. Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) предлагают в своих SPICE-моделях квазистатическое приближение диффузионного заряда [10]

$$Q_d(t) = i(t)T, \quad (2)$$

где  $i(t)$  – описываемый вольт-амперной характеристикой ток электропроводности;  $T$  – время жизни неравновесных носителей заряда. Данное представление не в состоянии удовлетворительно охарактеризовать процессы, протекающие в  $p-n$ -переходах, а именно инерцию накопления и релаксации неравновесных носителей заряда при прямом и обратном восстановлении. Это приводит к сглаживанию переходной характеристики прямого восстановления

$p$ - $n$ -перехода при моделировании  $p$ - $n$ -перехода на импульсных широкополосных сигналах [10].

Основная идея для усовершенствования модели (2), изложенная во многих работах, состоит в замене алгебраического уравнения (2) на дифференциальное следующего вида [11–15]:

$$Q_d(t) = i(t)T - \tau_d \frac{dQ_d(t)}{dt},$$

где  $\tau_d$  – постоянная времени релаксации диффузионного заряда. Основной недостаток данного представления  $Q_d$  сводится к тому, что последнее уравнение не является разрешенным относительно  $Q_d$  (в отличие от (2)), что приводит пользователя к необходимости применять рекурсивные алгоритмы для интеграции в САПР [10]. Кроме этого, в известных работах не рассмотрена реализация модели прямого восстановления в виде эквивалентной схемы.

Цель работы – на основе рассмотренных особенностей переходных процессов при импульсном прямом смещении  $p$ - $n$ -перехода предложить его неквазистатическую модель с возможностью простой интеграции этой модели в САПР.

#### Зависимость последовательного сопротивления потерь от диффузионного заряда $p$ - $n$ -перехода

Авторы предлагают модифицировать формулу (1) путем добавления не зависящего от заряда последовательного сопротивления потерь. Это та часть сопротивления, которая образуется на удаленных областях  $p$ - $n$ -перехода, в которых накопление неосновных носителей заряда незначительно. Тогда предлагаемая формула последовательного сопротивления  $p$ - $n$ -перехода имеет вид

$$R_S(Q_d) = \frac{1}{Y_0 + \alpha Q_d} + R_0, \quad (3)$$

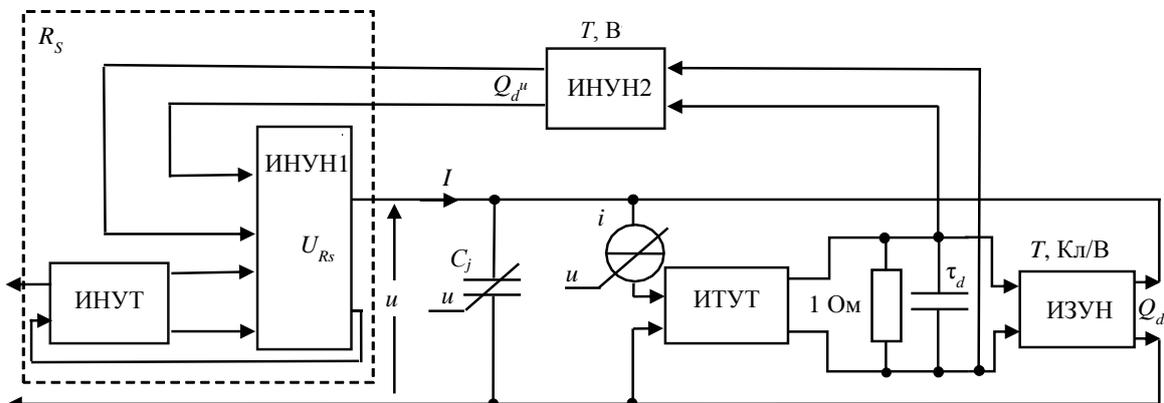


Рис. 1. Неквазистатическая эквивалентная схема  $p$ - $n$ -перехода

В предложенной эквивалентной схеме (см. рис. 1), диффузионный заряд отражается выходными сигналами двух блоков: на выходе источника заряда, управляемого напряжением (ИЗУН), и на выходе источника напряжения, управляемого напряжением (ИНУН2). В первом случае в блоке ИЗУН устанавливается коэффициент преобразования, численно равный времени жизни диффузионного заряда для

где  $R_0$  – не зависящее от диффузионного заряда значение последовательного сопротивления потерь. Величина  $R_0$  определяется толщиной базы и омическим сопротивлением выводов.

Для нахождения диффузионного заряда будем использовать предложенную авторами ранее формулу [10]

$$Q_d(t) = h(t) * i(t) T, \quad (4)$$

где  $*$  – символ свертки,  $h(t)$  – импульсная характеристика, определяющая произвольное линейное преобразование тока электропроводности через диод в заряд неравновесных носителей. Эта формула определяет диффузионный заряд в замкнутой, разрешенной относительно диффузионного заряда неквазистатической форме, учитывающей инерцию накопления и релаксации неравновесных носителей заряда.

Использование формулы (4) позволит без затруднений реализовать модель диода в современных САПР в виде соответствующей эквивалентной схемы, так как  $Q_d$  представлен в явной форме, и поэтому применение рекурсивных алгоритмов не требуется.

#### Структурный синтез неквазистатической эквивалентной схемы для режима прямого восстановления $p$ - $n$ -перехода

Для реализации модели прямого восстановления  $p$ - $n$ -перехода в САПР предлагается эквивалентная схема, приведенная на рис. 1.

Ранее авторами было установлено [10], что для реализации неквазистатического уравнения диффузионного заряда (4) эквивалентная электрическая цепь должна иметь импеданс параллельной  $RC$ -цепи. Емкость конденсатора  $RC$ -цепи численно равна постоянной времени  $\tau_d$  при  $R = 1$  Ом. Параметр  $\tau_d$  устанавливает динамический процесс накопления и релаксации неравновесных носителей заряда.

добавления к заряду  $p$ - $n$ -перехода. Во втором случае блок ИНУН2 предназначен для получения напряжения, численно равного значению диффузионного заряда  $Q_d$ , путем умножения напряжения с  $RC$ -цепи на время жизни неравновесных носителей заряда  $T$ . Данное решение предложено из-за отсутствия в САПР источников сигналов, управляемых зарядом (для вычислений по (3)).

Отличительная особенность схемы на рис. 1 заключается в учете неквазистатических свойств прямого восстановления. Неквазистатические свойства реализуются в блоке ИНУН1, где происходит расчет падения напряжения на  $R_s$  по формуле

$$U_{R_s} = \left( \frac{1}{Y_0 + \alpha Q_d''} + R_0 \right) I, \quad (5)$$

где  $I$  – ток диода, а множитель в скобках представляет собой последовательное сопротивление  $p-n$ -перехода (см. формулу (3)). Выход блока источника напряжения управляемым током (ИНУТ) формирует напряжение, численно равное току диода  $I$ . Источник тока, управляемый током ИТУТ, введен в качестве развязывающего буфера.

Параметры формулы (5)  $R_0$ ,  $Y_0$  и  $\alpha$  реализованы в виде констант. Кроме того, в схеме учитывается барьерная емкость  $p-n$ -перехода  $C_j$ .

Эквивалентная схема разработана с возможностью беспрепятственной ее реализации в популярных САПР (например, AWR Design Environment и Advanced Design System), так как предложенные элементы имеются во многих библиотеках современных САПР. Пример реализации приведен ниже.

#### Объект исследования

В качестве примера для экспериментальных измерений используем биполярный транзистор  $n-p-n$ -типа 2N6488G производства ON Semiconductor. Транзистор исследуется в диодном включении эмиттерного перехода. Коллектор при этом замкнут с базой.

Экспериментальные измерения и моделирование прямого восстановления  $p-n$ -перехода проводятся по схеме двухполюсника.

#### Параметрический синтез неквазистатической эквивалентной схемы $p-n$ -перехода

Экстракция большинства параметров представленной на рис. 1 модели происходит обычными способами из вольт-амперной характеристики (ВАХ) и вольт-фарадной характеристики (ВФХ) эмиттерного перехода [16–20].

Из ВАХ рассчитываются параметры нелинейного источника тока на рис. 1: ток насыщения  $I_s$  и коэффициент неидеальности  $N$ , входящие в формулу

$$i(u) = I_s \left( \exp \frac{q}{NkT} u - 1 \right),$$

где  $q$  – заряд электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура.

Из ВФХ определяются параметры барьерной емкости  $C_j$ : емкость при нулевом смещении  $C_{j0}$ , контактная разность потенциалов  $V_j$  и градиентный коэффициент  $M$ , входящие в формулу

$$C_j(u) = C_{j0} \left( 1 - \frac{u}{V_j} \right)^{-M}.$$

Время обратного восстановления  $t_{вос}$  определяется по кривой обратного восстановления  $p-n$ -перехода (рис. 2). Измерение в соответствии со стандар-

том [21] приводит к систематической погрешности измерения, из-за добавления к действительному времени восстановления половины длительности фронта импульса обратного напряжения. Поэтому решено использовать способ, приведенный в источнике [22].

Время жизни неравновесных носителей заряда  $T$  определяется по кривой обратного восстановления  $p-n$ -перехода как отношение диффузионного заряда к прямому току. Диффузионный заряд – это разность между общим и барьерным зарядом  $p-n$ -перехода. Общий заряд неосновных носителей вычисляется путем интегрирования кривой (см. рис. 2) на интервале, где первая и вторая отсчётная точка имеет ток, равный нулю. Барьерный заряд отыскивается путем интегрирования вольт-фарадной характеристики диода (от 0 до 5 В).

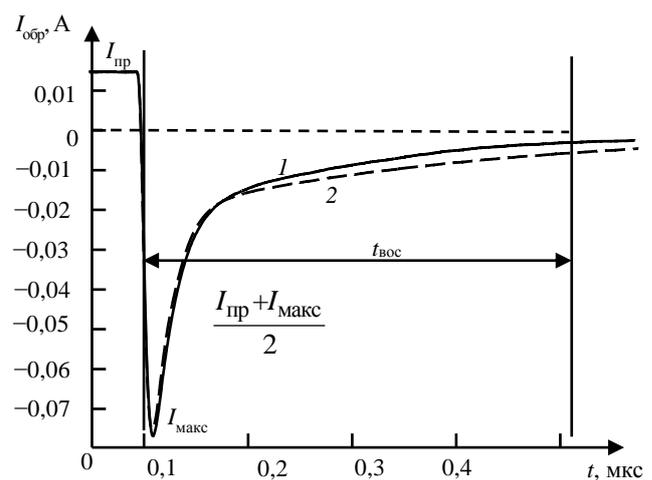


Рис. 2. Импульс тока обратного восстановления эмиттерного перехода биполярного транзистора: 1 – эксперимент; 2 – неквазистатическая модель

Постоянная времени  $\tau_d$  (см. рис. 1) определяется путем минимизации невязки экспериментальной (кривая 1, рис. 2) и модельной кривой (кривая 2, рис. 2), полученной путем расчета на компьютерной модели, реализованной по предложенной схеме (см. рис. 1).

В итоге SPICE-параметры эмиттерного перехода биполярного транзистора получились равными:  $I_s = 2,6$  пА;  $N = 0,9569$ ;  $M = 0,41$ ;  $V_j = 0,44$  В;  $C_{j0} = 419$  пФ;  $T = 416$  нс;  $\tau_d = 300$  нс.

При экстракции параметров трудности вызывает вычисление последовательного сопротивления потерь. При прямом измерении доступна только сумма сопротивления  $p-n$ -перехода и последовательного сопротивления потерь  $R_s$ .  $R_s$  будем определять как разность дифференциального сопротивления диода  $r_d$  и дифференциального сопротивления  $p-n$ -перехода  $r_{pn}$  [23]. Удобство оперирования дифференциальными сопротивлениями состоит в том, что для отыскания сопротивления  $p-n$ -перехода  $r_{pn}$  достаточно определить лишь коэффициент неидеальности  $N$ .

На рис. 3 приведены дифференциальные сопротивления диода (кривая 1) и  $p-n$ -перехода (кривая 2).

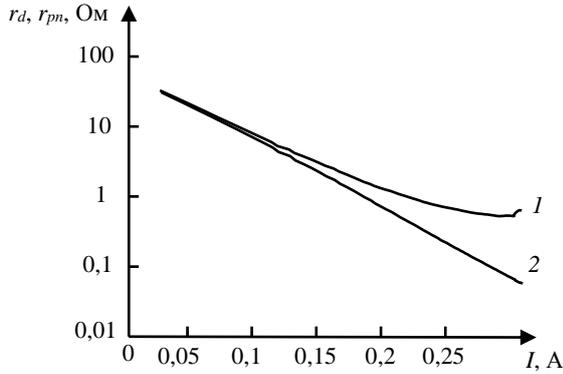


Рис. 3. Сопротивления  $p-n$ -перехода:  
 1 – дифференциальное сопротивление диода;  
 2 – дифференциальное сопротивление  $p-n$ -перехода

Дифференциальное сопротивление диода вычисляется дифференцированием ВАХ. Авторы применили численное дифференцирование по пяти экспериментальным точкам. Дифференциальное сопротивление  $p-n$ -перехода вычисляется как гиперболическая функция тока, построенная по коэффициенту неидеальности эмиттерного перехода, найденного в области максимального наклона ВАХ [23]:

$$r_{pn}(I) = \frac{NTk}{Iq}$$

На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальная кривые последовательного сопротивления потерь  $R_s$   $p-n$ -перехода, демонстрирующие его зависимость от тока, проходящего через диод. Для демонстрации целесообразности введения переменной  $R_0$  приведена кривая (кривая 1), построенная по формуле (1). Параметры  $Y_0$  и  $\alpha$  функций (1) и (3) подбираются так, чтобы обеспечить наименьшую невязку между моделью (кривая 1 и 2) и экспериментом (кривая 2). В итоге параметры  $Y_0$  и  $\alpha$  для формулы (3) равны 0,09 См и 400 МСм/Кл соответственно, а для формулы (1) – 0,7 См и 20 МСм/Кл соответственно. При этом  $R_0$  составляет 0,44 Ом.

Из рис. 4 также видно, что кривая 1, полученная по формуле (1), имеет существенное расхождение с

экспериментальной кривой 2, в то время как кривая 3, построенная по предложенной авторами формуле (3), соответствует экспериментальной кривой 2 значительно лучше.

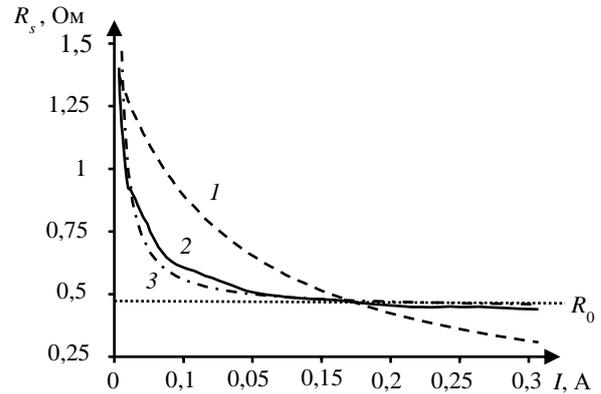


Рис. 4. Последовательное сопротивление потерь:  
 1 – расчет по формуле (1); 2 – эксперимент;  
 3 – расчет по формуле (3)

Кривые на рис. 4 можно интерпретировать следующим образом. Перед включением диода заряд  $Q_d$  незначителен и  $R_s = 1/Y_0$ . Это аналогично использованию постоянного сопротивления  $R_s$  в обычной модели. Когда  $\alpha Q_d \gg Y_0$  последовательное сопротивление диода стремится к параметру  $R_0$ . При любом конечном токе диода, в том числе и в установившемся состоянии,  $R_s$  будет между крайними значениями  $1/Y_0$  и  $R_0$ .

**Реализация предлагаемой неквазистатической эквивалентной схемы  $p-n$ -перехода в системе автоматизированного проектирования**

На рис. 5 представлена неквазистатическая модель биполярного транзистора в диодном включении в САПР.

На рис. 5 элемент PNCAP предназначен для реализации нелинейной барьерной емкости эмиттерного перехода, элемент PNIV отвечает за вольт-амперную характеристику. За источник диффузионного заряда отвечает элемент DYN\_VCS.

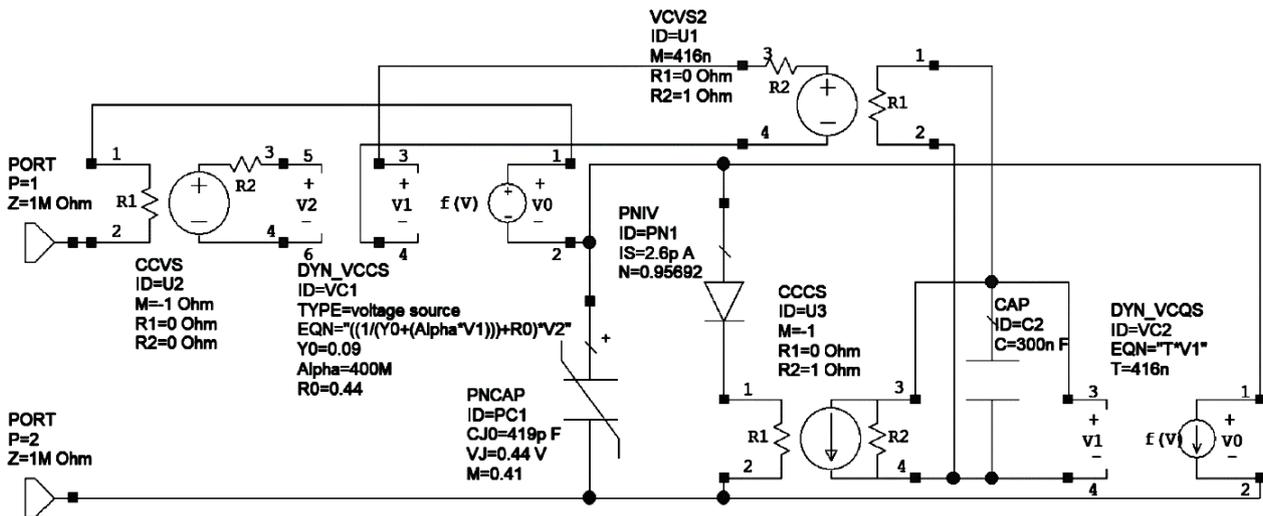


Рис. 5. Неквазистатическая модель биполярного транзистора 2N6488G в диодном включении, реализованная в САПР

ИНУН1, ИНУН2 и ИНУТ (см. рис. 1) реализуются на элементах DYN\_VCCS, VCVS ( $M$  численно равно  $T$ ) и CCVS соответственно. Формула (3) с ее параметрами реализована в элементе DYN\_VCCS.

#### Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных измерений в режиме прямого восстановления $p-n$ -перехода

Экспериментальная установка для измерений в режиме прямого восстановления включает в себя генератор Tabor Electronics 5201 и осциллограф National Instruments PXI-5114. Генератор формирует ступенчатое воздействие с амплитудой прямого тока 15 мА. С помощью осциллографа фиксируется напряжение на диоде.

Рис. 6 иллюстрирует кривые прямого напряжения на диоде, полученные с помощью эксперимента и моделирования.

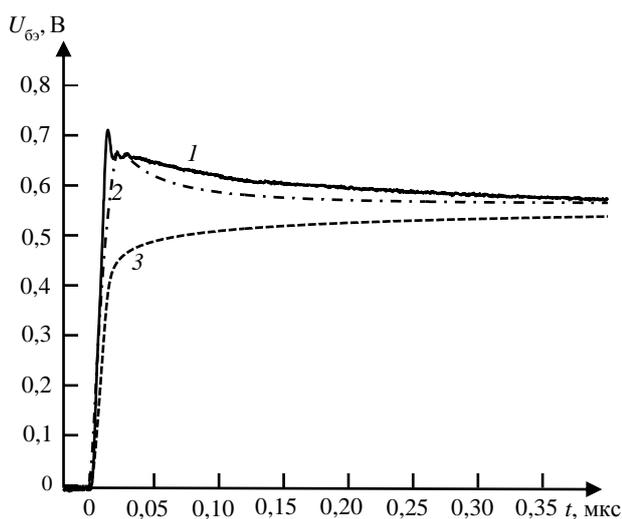


Рис. 6. Прямое напряжение на  $p-n$ -переходе:  
1 – эксперимент; 2 – неквазистатическая модель;  
3 – квазистатическая модель

На рис. 6 отчетливо наблюдается невязка кривой импульса напряжения прямого восстановления квазистатической модели диода (3) с экспериментальной кривой (1). В то же время кривая, полученная с помощью неквазистатической модели (2), имеет существенно меньшее расхождение с экспериментальной.

Невязка экспериментальной кривой (1) с предложенной неквазистатической моделью (2) не превышает  $\pm 9\%$ . Квазистатическая модель (3) имеет отклонение от экспериментальной кривой до  $\pm 35\%$ .

#### Заключение

На переходной характеристике прямого восстановления  $p-n$ -переходов наблюдается выброс напряжения, обусловленный зависимостью электропроводности базы диода от диффузионного заряда.

Известные модели, учитывающие этот эффект, получены в предположении равномерного распределения диффузионного заряда по базе диода, что приводит к существенной погрешности моделирования последовательного сопротивления потерь диода при больших токах.

Авторами предложена модифицированная модель последовательного сопротивления диода, учитывающая уменьшение плотности диффузионного заряда при удалении от  $p-n$ -перехода. При этом значение диффузионного заряда рассчитывается в неквазистатическом приближении, учитывающем конечную подвижность неравновесных носителей заряда.

Предложенная модель реализована в виде эквивалентной схемы, допускающей реализацию в современных САПР на пользовательском уровне.

Большинство параметров в предложенной эквивалентной схеме не требуют нестандартных способов экстракции. Параметры зависимости последовательного сопротивления потерь от тока  $p-n$ -перехода определяются вариационным методом до обеспечения наименьшей невязки между расчетной и экспериментальной кривыми зависимости последовательного сопротивления потерь от тока  $p-n$ -перехода.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWRM-2021-0015.

#### Литература

1. Tseng K.J. Modelling of diode forward recovery characteristics using a modified charge-control equation // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1998. – Vol. 84, No. 5. – P. 437–444.
2. Complete Time-Domain Diode Modeling: Application to Off-Chip and On-Chip Protection Devices / B.B. M'Hamed, F. Torres, A. Reineix, P. Hoffmann // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2011. – Vol. 53, No. 2. – P. 349–365.
3. Лосев Д.В. Возбуждение полупроводникового диода коротким импульсом / Д.В. Лосев, Д.С. Бардашов, А.Г. Быков // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8-2. – С. 147–150.
4. Айзенштат Г.И. Переходные процессы в СВЧ-диодных на арсениде галлия / Г.И. Айзенштат, А.Ю. Ющенко, В.Г. Божков // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 12. – С. 14–19.
5. Разработка и исследование СВЧ-ограничителей мощности на основе  $pin$ -диодов / А.Ю. Ющенко, Г.И. Айзенштат, Е.А. Монастырев, А.А. Ивашенко, А.В. Акимов // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9-2. – С. 315–319.
6. Ebers J.J. Large-Signal Behavior of Junction Transistors / J.J. Ebers, J.L. Moll // Proceedings of the IRE. – 1954. – Vol. 42, No. 12. – P. 1761–1772.
7. SPICE Modeling of Photoelectric Effects in Silicon With Generalized Devices / C. Rossi, P. Buccella, C. Stefanucci, J.M. Sallese // IEEE Journal of the Electron Devices Society. – 2018. – Vol. 6, No. 2. – P. 985–995.
8. Huszka Z. Implementation of Delay-Time-Based Nonquasi-Static Bipolar Transistor Models in Circuit Simulators / Z. Huszka, A. Chakravorty // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2014. – Vol. 61, No. 8. – P. 3004–3006.
9. Winkel J. Extended charge-control model for bipolar transistors // IEEE Transactions on Electron Device. – 1973. – Vol. 20, No. 12. – P. 389–394.
10. Семенов Э.В. Неквазистатическая модель  $p-n$ -перехода без рекурсии на пользовательском уровне /

Э.В. Семенов, О.Ю. Малаховский // Изв. вузов. Физика. – 2019. – Т. 62, № 6. – С. 151–156.

11. Lauritzen P.O. A Simple Diode Model with Reverse Recovery / P.O. Lauritzen, C.L. Ma // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1991. – Vol. 6, No. 2. – P. 188–191.

12. Yang A.T. An Efficient Nonquasi-Static Diode Model for Circuit Simulation / A.T. Yang, Yu Liu, J.T. Yao // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1994. – Vol. 13, No. 2. – P. 231–234.

13. Tien B. Determination of carrier lifetime from rectifier ramp recovery waveform // IEEE Electron Device Lett. – 1988. – Vol. 9, No. 10. – P. 553–555.

14. Sochova L. Enhanced Non-quasi-static Lauritzen Diode Model / L. Sochova, P. Betak, J. Plojhar // IETE Journal of Research. – 2014. – Vol. 58, No. 3. – P. 226–229.

15. Koldehoff A.A. Compact Bipolar Transistor Model for Very-High-Frequency Applications with Special Regard to Narrow Emitter Stripes and High Current Densities / A. Koldehoff, M. Schroter, H.M. Rein // Solid-State Electron. – 1993. – Vol. 36, No. 7. – P. 1035–1048.

16. Rudolph M. Nonlinear Transistor Model Parameter Extraction Techniques / M. Rudolph, C. Fager, D.E. Root – Cambridge, United Kingdom: University Press, 2012. – 352 p.

17. Значение высоты барьера Шоттки и расчет ВАХ диодов Al/n-(SiC)[1-x](AlN)x и гетеропереходов на основе 4H-SiC / В.И. Алтухов, А.В. Санкин, В.Ф. Антонов, С.В. Филипова, О.А. Митюгова // Изв. вузов. Физика. – 2019. – Т. 62, № 9. – С. 113–116.

18. Sadovnikov A.D. Parameter extraction for bipolar transistors / A.D. Sadovnikov, D.J. Roulston, D. Celi // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1996. – Vol. 15, No. 11. – P. 1332–1339.

19. Прудаев И.А. Ограничение тока в светодиодах на основе нитридов AzBs при прямом смещении / И.А. Прудаев, И.В. Ивонин, О.П. Толбанов // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 12. – С. 66–68.

20. Dvorak M.W. On the accuracy of direct extraction of the heterojunction-bipolar-transistor equivalent-circuit model parameters  $C_p, C_{bc}$ , and  $R_E$ ; T-MTT / M.W. Dvorak, C.R. Volognesi // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2003. – Vol. 51, No. 6. – P. 1640–1649.

21. ГОСТ 18986.8–73. Диоды полупроводниковые. Метод измерения времени обратного восстановления. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1973. – 5 с.

22. Шевченко Г.М. Уменьшение погрешности измерения времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов при использовании осциллографов с узкой полосой пропускания / Г.М. Шевченко, Э.В. Семенов // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 37–41.

23. Семенов Э.В. Неквазистатическая модель диода с учетом токов экстракции и рекомбинации неравновесных носителей заряда / Э.В. Семенов, О.Ю. Малаховский, В.Г. Божков // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 26–32.

#### Шевченко Глеб Михайлович

М.н.с. лаб. нелинейной видеоимпульсной локации Института сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), ассистент каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Академический пр-т, 2/3, г. Томск, Россия, 634055  
ORCID: 0000-0002-1752-3671  
Тел.: +7-960-976-1991  
Эл. почта: gleb.m.shevchenko@tusur.ru

#### Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, доцент, с.н.с. лаб. нелинейной видеоимпульсной локации Института сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), профессор каф. РСС ТУСУР Академический пр-т, 2/3, г. Томск, Россия, 634055  
ORCID: 0000-0001-5470-1185  
Тел.: +7-909-539-1176  
Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Shevchenko G.M., Semyonov E.V.

#### Non-quasi-static model of transient processes in a forward-biased $p-n$ -junction

A voltage surge at the beginning of the transient characteristic for a forward-biased  $p-n$ -junction is demonstrated, which occurs due to the dependence of the series loss resistance on the diffusion charge. It is shown that modern SPICE models of a  $p-n$ -junction do not allow one to describe this surge due to the fact that the series resistance is assumed to be independent of the charge, and the accumulated diffusion charge is calculated in the quasi-static approximation. A non-quasi-static model of transient processes in a forward-biased  $p-n$ -junction is proposed, which correctly describes the overshoot in the direct recovery transient response. The proposed model includes only common quasistatic elements of computer-aided design systems, which makes it available for implementation at the user level.

**Keywords:**  $p-n$ -junction, direct recovery, series loss resistance, diffusion charge, non-quasi-static model.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-7-13

#### References

1. Tseng K.J. Modelling of diode forward recovery characteristics using a modified charge-control equation. *International Journal of Electronics*, 1998, vol. 84, no. 5, pp. 437–444.
2. M'Hamed B.B., Torres F., Reineix A., Hoffmann P. Complete Time-Domain Diode Modeling: Application to Off-Chip and On-Chip Protection Devices. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, vol. 53, no. 2, pp. 349–365.
3. Losev D.V., Bardashov D.S., Bykov A.G. [Excitation of a semiconductor diode with a short pulse]. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2015, vol. 58, no 8-2, pp. 147–150 (in Russ.).
4. Aizenshtat G.I., Yushchenko A.Yu., Bozhkov V.G. [Transient processes in microwave pin diodes based on gallium arsenide]. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2014, vol. 57, no. 12, pp. 14–19 (in Russ.).
5. Yushchenko A.Yu., Aizenshtat G.I., Monastyrnev E.A., Ivashchenko A.A., Akimov A.V. [Development and research of microwave power limiters based on pin diodes]. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2010, vol. 53, no. 9-2, pp. 315–319 (in Russ.).
6. Ebers, J.J., Moll J.L. Large-Signal Behavior of Junction Transistors. *Proceedings of the IRE*, 1954, vol. 42, no. 12, pp. 1761–1772.
7. Rossi C., Buccella P., Stefanucci C., Sallese J.M. SPICE Modeling of Photoelectric Effects in Silicon With Generalized Devices. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 985–995.
8. Huszka Z., Chakravorty A. Implementation of Delay-Time-Based Nonquasi-Static Bipolar Transistor Models in Circuit Simulators. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, vol. 61, no. 8, pp. 3004–3006.
9. Winkel J. Extended charge-control model for bipolar transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1973, vol. 20, no. 12, pp. 389–394.

10. Semyonov E.V., Malakhovskij O.Yu. Non-quasi-static  $p$ - $n$ - junction model without userdefined recursion. *Russian Physics Journal*. 2019. vol. 62, no. 6, pp. 151–156 (in Russ.).
11. Lauritzen P., Ma C. A Simple Diode Model with Reverse Recovery. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1991, vol. 6, no. 2, pp.188–191.
12. Yang A.T., Liu Yu, Yao J.T. An Efficient Nonquasi-Static Diode Model for Circuit Simulation. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1994, vol. 13, no. 2, pp. 231–234.
13. Tien B., Hu C. Determination of carrier lifetime from rectifier ramp recovery waveform. *IEEE Electron Device Letters*, 1988, vol. 9, no. 10, pp. 553–555.
14. Sochova L., Betak P., Plojhar J. Enhanced Non-quasi-static Lauritzen Diode Model. *IETE Journal of Research*, 2014, vol. 58, no. 3, pp. 226–229.
15. Koldehoff A., Schroter M., Rein H. M. A Compact Bipolar Transistor Model for Very-High-Frequency Applications with Special Regard to Narrow Emitter Stripes and High Current Densities. *Solid-State Electron*, 1993, vol. 36, no. 7, pp. 1035–1048.
16. Rudolph M., Fager C., Root D.E. *Nonlinear Transistor Model Parameter Extraction Techniques*. Cambridge, United Kingdom: University Press, 2012. 352 p.
17. Altukhov V.I., Sankin A.V., Antonov V.F., Filipova S.V., Mityugova O.A. [The value of the height of the Schottky barrier and the calculation of the CVC of Al/n-(SiC)[1-x](AlN)x diodes and heterojunctions based on 4H-SiC]. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2019, vol. 62, no. 9, pp. 113–116 (in Russ.).
18. Sadovnikov A.D., Roulston D.J., Celi D. Parameter extraction for bipolar transistors. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1996, vol. 15, no. 11, pp. 1332–1339.
19. Prudaev I.A., Ivonin I.V., Tolbanov O.P. [Current limitation in LEDs based on A3B5 nitrides with forward bias]. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2011, vol. 62, no. 12, pp. 66–68 (in Russ.).
20. Dvorak M.W., Bolognesi C.R. On the accuracy of direct extraction of the heterojunction-bipolar-transistor equivalent-circuit model parameters  $C_{p,CBC}$ , and  $R_E$ ; *T-MTT. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, vol. 51, no. 6, pp. 1640–1649
21. GOST 18986.8-73. Semiconductor diodes. The method of measuring the reverse recovery time. Moscow, Standartinform Publ., 1973, 5 p. (in Russ.).
22. Shevchenko G.M., Semyonov E.V. [Reducing the error in measuring the reverse recovery time of fast recovery diodes when using oscilloscopes with a narrow bandwidth]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 37–41 (in Russ.).
23. Semyonov E.V., Malakhovskij O.Yu, Bozhkov V.G. [Non-quasi-static model of the diode taking into account the currents of extraction and recombination of non-equilibrium charge carriers.]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 26–32 (in Russ.).

---

**Gleb M. Shevchenko**

Junior Researcher, Department of Nonlinear Video Pulse Location, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Assistant, Department of Radiocommunication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
2, Akademicheskyy pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia  
ORCID: 0000-0002-1752-3671  
Phone: +7-960-976-19-91  
Email: gleb.m.shevchenko@tusur.ru

**Edward V. Semyonov**

Doctor of Science in Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Department of Nonlinear Baseband Pulse Location, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor, Department of Radiocommunication Systems, TUSUR  
2, Akademicheskyy pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia  
ORCID: 0000-0001-5470-1185  
Phone: +7-909-539-11-76  
Email: edwardsemyonov@narod.ru

УДК 621.396.6:621.391.827

Р.С. Суровцев, И.А. Скорняков, С. Карри

## Миниатюризация устройства на основе витка меандровой линии с помощью дополнительных заземленных проводников

Исследована возможность уменьшения занимаемой площади на печатной плате витка меандровой линии с сохранением его защитных свойств за счет использования дополнительных заземленных проводников. В результате квазистатического и электродинамического моделирования выявлены закономерности подавления СКИ. Показана возможность уменьшения ширины устройства на 45% от исходной с ослаблением амплитуды сигнала не менее трех раз.

**Ключевые слова:** помехозащита, сверхкороткий импульс, меандровая линия, виток.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-14-20

Современные электронные системы постоянно совершенствуются, становясь все более функциональными, компактными и быстродействующими, но при этом более сложными и уязвимыми к электромагнитным воздействиям (ЭМВ). К таким ЭМВ можно отнести сверхкороткие импульсы (СКИ), которые за счет широкого спектра могут практически беспрепятственно проникать внутрь аппаратуры [1]. Часто СКИ имеют высокую амплитуду, что может привести к временному сбою или полному выходу устройства из строя [2]. Специфика воздействия СКИ состоит в том, что наводки от него могут восприниматься в качестве полезных сигналов, нарушая цифровой обмен, а при высокой амплитуде приводить к нарушению их работы [3]. Это связано с тем, что за время действия энергия СКИ не успевает передаться окружающим элементам, а её более высокая плотность способствует дефектообразованию в чувствительных зонах выделения тепла [2].

Для построения защиты от ЭМВ широко исследуется возможность применения полосковых устройств [4–8]. Один из новых подходов к защите от СКИ основан на его модальном разложении на составляющие из-за различия скоростей их распространения в полосковых устройствах в форме меандра (более 15 патентов на изобретение) [9]. В самом простом случае подход позволяет разложить СКИ на 3 основные (по максимальной амплитуде) составляющие (перекрестную наводку и импульсы четной и нечетной мод), что уменьшает влияние СКИ [10]. Несмотря на широту исследований данного подхода, ряд вопросов остается открытым.

Одним из таких вопросов является исследование возможности совершенствования защитных полосковых устройств за счет уменьшения их размеров с сохранением защитных свойств. В рамках одного из последних исследований изготовлена печатная плата (с размерами  $80 \times 80 \text{ мм}^2$ ) с макетом витка меандровой линии с сильной торцевой связью и длиной 1 м [11]. Для его размещения на такой плате виток с сильной связью (для ясности далее авторы называют его основным) свернут в еще одну меандровую линию со слабой связью между витками (для ясности авторы называют их неосновными) [12]. В результате предварительного моделирования выяв-

лено, что для минимизации связи нужно обеспечить расстояние между неосновными витками  $10w$  (где  $w$  – ширина проводника), поскольку иначе формы импульсов мод будут накладываться, что приведет к росту амплитуды на выходе основного витка. Но эта структура не оптимальна. Для ее совершенствования между неосновными витками могут быть размещены развязывающие проводники [13], что позволит минимизировать связь между проводниками неосновного витка и уменьшить конечные размеры всего устройства. Цель работы – исследовать возможность уменьшения размеров пассивных полосковых устройств с сохранением свойств защиты от СКИ за счет использования развязывающих проводников.

### Исследуемая структура

Сначала рассмотрим модель исходного и модифицированного витков (рис. 1). Исходный виток (в литературе его также называют С-секцией [14]) представляет собой связанную линию из двух проводников, закороченных на дальнем конце. Он свернут в меандровую линию из 19 полувитков со слабой связью между неосновными витками (рис. 1, а). Параметры его поперечного сечения следующие: ширина сигнального проводника  $w = 300 \text{ мкм}$ , расстояние между сигнальными проводниками  $s_1 = 100 \text{ мкм}$ , расстояние между неосновными витками  $s_2 = 10w$ , толщина фольги  $t = 35 \text{ мкм}$ , толщина подложки  $h = 508 \text{ мкм}$  с относительной диэлектрической проницаемостью на частоте 10 ГГц (при  $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $\epsilon_r = 3,38 \pm 0,05$ . Общая длина составила 2650 мм. Для минимизации связи между неосновными витками предложено проложить дополнительные заземленные проводники шириной  $w_2$  на расстоянии  $s_2$  от сигнальных проводников основного витка (рис. 1, б). Эффективность такого подхода с точки зрения затрат на проектирование и ослабление связи зависит от выбора геометрии проводника и его соединения с опорным проводником, поскольку применение излишне широких трасс хоть и позволит уменьшить связь, но также не приведет к должному уменьшению размеров на плате [15]. Пример поперечного сечения модифицированного витка для произвольного числа проводников ( $N$ ) показан на рис. 2, а на рис. 3 – пример поперечного сечения неосновного витка с дополнительным заземленным проводником.

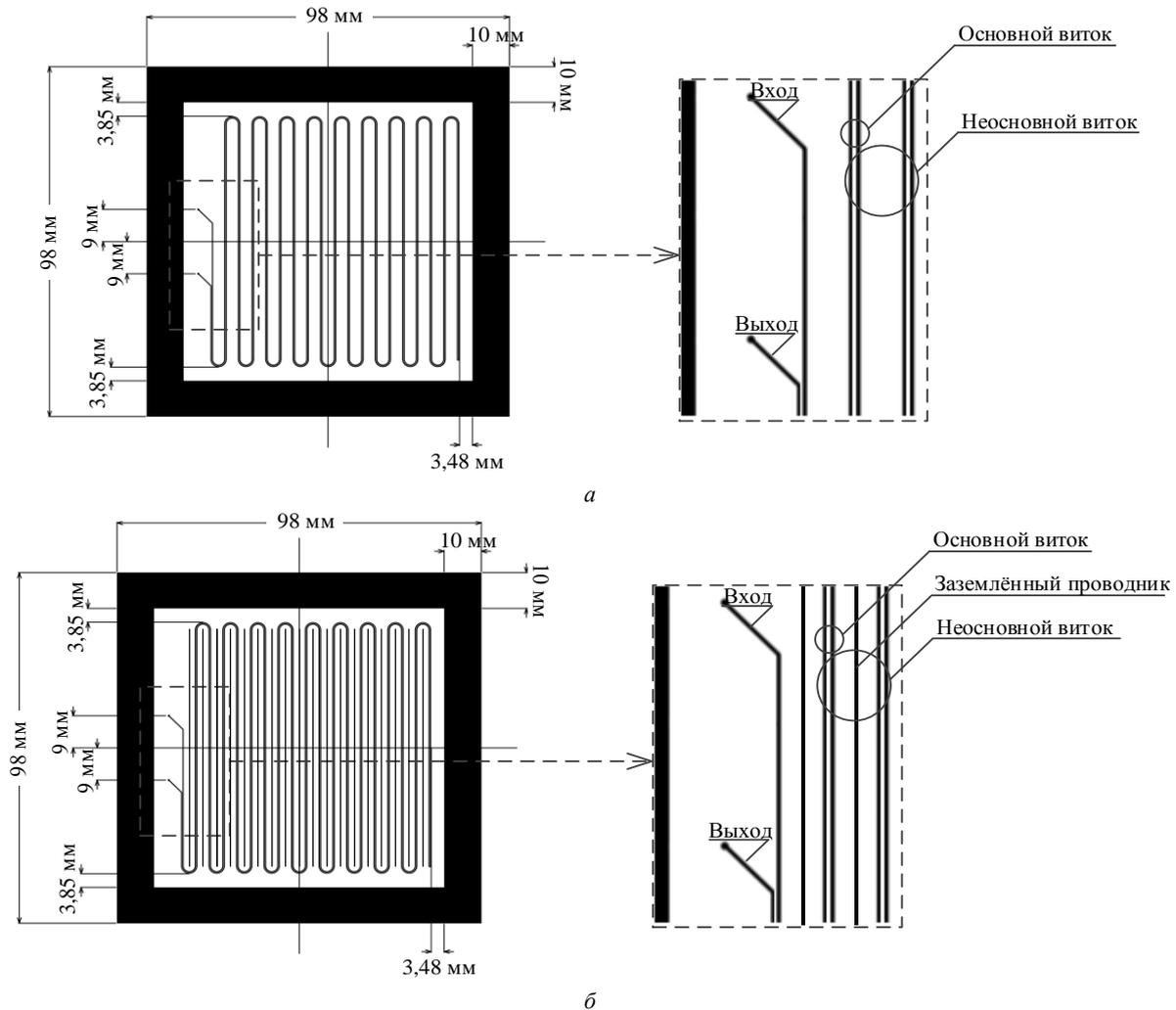


Рис. 1. Вид макетов печатной платы с моделью исходного (а) и модифицированного (б) витков

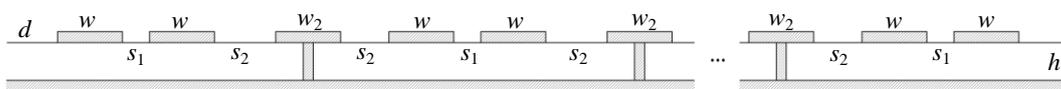


Рис. 2. Поперечное сечение модифицированного витка меандровой линии для произвольного N

**Оценка взаимовлияний в линии**

Сначала оценены коэффициенты ёмкостной  $K_C$  и индуктивной  $K_L$  связи между соседними проводниками 2, 3 (рис. 3) для 10 наборов параметров  $w_2$  и  $s_2$ , которые сведены в табл. 1.

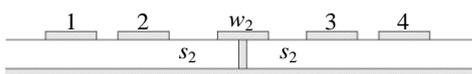


Рис. 3. Поперечное сечение одного неосновного витка с дополнительным заземлённым проводником

Т а б л и ц а 1

**Наборы параметров развязывающего проводника**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$w_2$ , мм	0,3				0,1					
$s_2$ , мм	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1

Оценка коэффициентов  $K_C$  и  $K_L$  выполнена на основе матриц погонных коэффициентов электростатической (С) и электромагнитной индукции (L)

$$K_C = -C_{23}(C_{22}C_{33})^{-0,5}, \quad K_L = L_{23}(L_{22}L_{33})^{-0,5}. \quad (1)$$

Дополнительно в табл. 2 сведены коэффициенты импедансной связи между проводниками основного витка ( $k_1$ ) и внутренними проводниками неосновного ( $k_2$ ) витка, которые вычислены по выражению (2) [16, 17]

$$k_1 = \frac{Z_{12}}{\sqrt{Z_{11}Z_{22}}}, \quad k_2 = \frac{Z_{23}}{\sqrt{Z_{22}Z_{33}}}. \quad (1)$$

Вычисленные значения коэффициентов  $K_C$  и  $K_L$  для наборов 1–10 сведены в табл. 2. Из нее видно, что при  $w_2 = 300$  мкм последовательное уменьшение  $s_2$  от 1200 до 100 мкм приводит к росту значения  $K_C$  в 7,65 раза, а  $K_L$  – в 2,5 раза. При  $w_2 = 100$  мкм такое же изменение  $s_2$  привело к росту значения  $K_C$  в 17,9 раза, а  $K_L$  – в 5 раз. При  $s_2 = 1200$  мкм уменьшение  $w_2$  от 300 до 100 мкм привело к росту значения  $K_C$  в 1,27 раза, а  $K_L$  – в 1,21 раза. При  $s_2 = 100$  мкм это увеличение  $K_C$  и  $K_L$  составило 2,96 и 2,12 раза соответственно. Также видно, что с уменьшением  $s_2$  коэффициент  $k_2$  увеличивается в 3,6 и 6,9 раза для

наборов 1–5 и 6–10 соответственно и находится между соответствующими значениями коэффициентов  $K_C$  и  $K_L$ , что согласуется с теорией. Коэффициент  $k_1$ , наоборот, уменьшается в 1,2 раза для всех наборов.

На данном этапе анализа наибольший интерес для уменьшения занимаемой площади представляют наборы параметров 5 и 9. Для них общее расстояние между сигнальными проводниками основного витка составляет 500 и 700 мкм соответственно.

Таблица 2  
Вычисленные значения коэффициентов  $K_C$  и  $K_L$   
и коэффициенты импедансной связи  $k_i$

№	$K_C$	$K_L$	$k_1$	$k_2$
1	0,0026	0,0171	0,4242	0,0109
2	0,0039	0,0228	0,4196	0,0149
3	0,0064	0,0427	0,4104	0,0209
4	0,0118	0,0427	0,3901	0,0306
5	0,0199	0,0496	0,3509	0,0391
6	0,0033	0,0207	0,4249	0,0132
7	0,0053	0,0292	0,4206	0,0191
8	0,0103	0,0435	0,4119	0,0299
9	0,0261	0,0714	0,3925	0,0543
10	0,0591	0,1051	0,3543	0,091

При сравнении коэффициентов  $K_C$  и  $K_L$  видно, что набор 5 более предпочтительный, поскольку приводит к меньшим значениям коэффициентов при меньшем общем расстоянии между проводниками основного витка. Необходимо отметить, что выбор набора 10 избыточен, поскольку приводит к наибольшим значениям коэффициентов  $K_C$  и  $K_L$ , хотя и обеспечивает наименьшее (300 мкм) расстояние между сигнальными проводниками. Отметим, что при наборе 5 ширина всей линии уменьшается на 2,5 мм на каждый виток со слабой связью и при  $N = 19$  общая ширина линии уменьшается на 45 мм. При выборе набора 9 уменьшение составляет 2,3 мм на виток и 41,4 мм при  $N = 19$ . Таким образом, выбор любого из наборов позволит получить существенное уменьшение размеров при исходной длительности воздействия либо увеличить (почти в 2 раза) длительность воздействия при исходных размерах.

#### Квазистатическое моделирование

Сначала для наборов 1–10 выполнено квазистатическое моделирование временного отклика на выходе витка без развязывающего проводника и с ним при  $N = 2$  и 19 в TALGAT [18]. Параметры воздействия: ЭДС источника 1 В, общая длительность воздействия 1 нс. При квазистатическом моделировании невозможно учесть искажения сигнала из-за перекрестных связей между проводниками на участке скругления линии. Для компенсации этого длина одного полувитка со слабой связью изменяется так, чтобы обеспечить общую длину витка 2650,6 мм при любом  $N$ . В качестве примера на рис. 4 показаны вычисленные формы сигнала для набора 1.

Из рис. 4 видно, что для каждого из случаев в конце линии наблюдается разложение на импульсы 1–3: перекрестной наводки, четной и нечетной мод.

Отметим, что при увеличении  $N$  форма импульса 1 практически не искажается, поскольку он проявляется вместе с началом распространения основного сигнала. На спаде импульса 2 и фронте импульса 3 наблюдаются искажения из-за отражений. Также видно, что при увеличении  $N$  до 19 амплитуда отражений уменьшается из-за одновременного прихода и взаимной компенсации отражений от большого числа стыков полувитков.

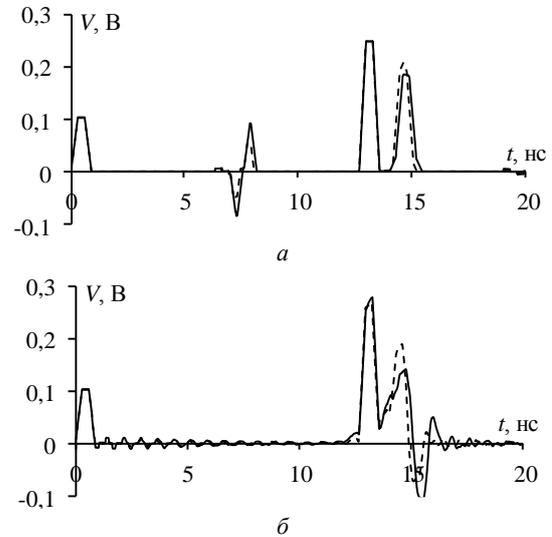


Рис. 4. Формы напряжения на выходе витка: а – при  $N = 2$  без развязывающего проводника (—) и с ним (---); б –  $N = 19$  для набора параметров 1

Из сравнения форм сигнала для структуры без развязывающего проводника и с ним, прежде всего, следует отметить, что для структуры с развязывающим проводником амплитуды отраженных разнополяризованных импульсов ниже, чем для случая без них. Это значит, что и искажения формы сигнала, связанные с влиянием отражений, будут менее существенны, что видно из рис. 4, б. Между тем в большей степени проявляются модальные искажения. Отметим, что максимальная амплитуда сигнала определяется амплитудой импульса 2, искажения которого проявляются в виде увеличения его амплитуды, что приводит к уменьшению ослабления СКИ в конце устройства. Так, максимальная амплитуда выходного сигнала для структуры без развязывающего проводника возрастает при увеличении  $N$  от 2 до 19 с 249 до 278 мВ, а для структуры с развязывающим проводником – с 248 до 267 мВ. Как видно, ослабление во втором случае незначительно возросло при уменьшении занимаемой площади на плате.

Затем оценено влияние потерь на форму напряжения в конце модифицированного витка при  $N = 19$ . Для этого вычислены матрицы погонных сопротивлений  $\mathbf{R}$  и проводимостей  $\mathbf{G}$ . Вычисление матрицы  $\mathbf{R}$  выполнено с учетом скин-эффекта, эффекта близости и потерь в плоскости земли [19]. Вычисление матрицы  $\mathbf{G}$  выполнено при  $\tan\delta = 0,003$ . Выявлено, что потери приводят к сглаживанию формы импульсов и незначительному уменьшению их амплитуды. Для экономии места некоторые формы сигнала при

учете потерь приведены в следующем разделе, а в табл. 3 сведены только амплитуды сигнала. Видно, что амплитуда уменьшается в среднем на 5–10%, а для набора 8 – до 17%. Для наборов 4, 5 и 9, 10 характерно увеличение амплитуды из-за практически полного наложения импульсов мод. Для демонстрации этого на рис. 5 показана форма напряжения на выходе витка с учетом и без учета потерь для набора 5. С точки зрения минимальной амплитуды предпочтительны наборы 1–3 и 6–8, поскольку имеют близкие значения амплитуды. Уменьшение ширины витка для них составит 5,4; 16,2 и 27 мм и 9; 19,8 и 30,6 мм соответственно. Применение наборов 4, 5 и 9, 10 требует дополнительной оценки разложения СКИ при дополнительном увеличении  $N$  за счет освободившейся площади на плате. Такой анализ решено вынести за рамки данной работы, поэтому далее будут рассмотрены только наборы 1–3 и 6–8.

Таблица 3

**Максимальная амплитуда (мВ) сигнала в конце модифицированного витка без учета и с учетом потерь**

№ набора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Без потерь	267	259	266	291	353	275	263	275	353	359
С потерями	241	244	251	269	315	242	247	259	292	321
$\delta$ , %	9,7	5,8	5,6	7,6	10,8	12	6,1	5,8	17,3	10,6

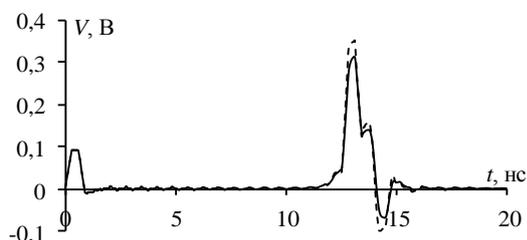


Рис. 5. Формы напряжения на выходе витка без учета потерь (---) и с потерями (—) при  $N=19$  для набора 5

**Электродинамическое моделирование**

Для подтверждения выявленных при квазистатическом моделировании закономерностей выполнено электродинамическое (полноволновое) моделирование модели витка с учетом потерь. Выполнено моделирование только при  $N = 19$ . Рассмотрены только наборы 1–3 и 6–8. Результаты моделирования форм напряжения на выходе витка попарно (для равных значений  $s_2$ , но разных  $w_2$ ) показаны на рис. 6. Также для сравнения приведены результаты квазистатического моделирования.

Поскольку при электродинамическом моделировании строится трехмерная модель витка, то возможно учесть длину скруглений на концах полувитков со слабой связью. Этот учет необходим, поскольку изменение  $w_2$  и  $s_2$  приводит к уменьшению длины перемычек, а это приводит к уменьшению общей длины линии  $l$ . Для обеспечения  $l = 2650,6$  мм для каждого из рассмотренных наборов вычисляется длина прямого участка проводника, путём вычитания из  $l$  суммы длин перемычек полувитков со слабой связью и суммарной длины проводников первого витка. Поскольку электродинамическое моделирование позволяет учесть распространение высших

типов волн, то при моделировании, помимо потерь в проводниках и диэлектрике, также учтены потери на излучение.

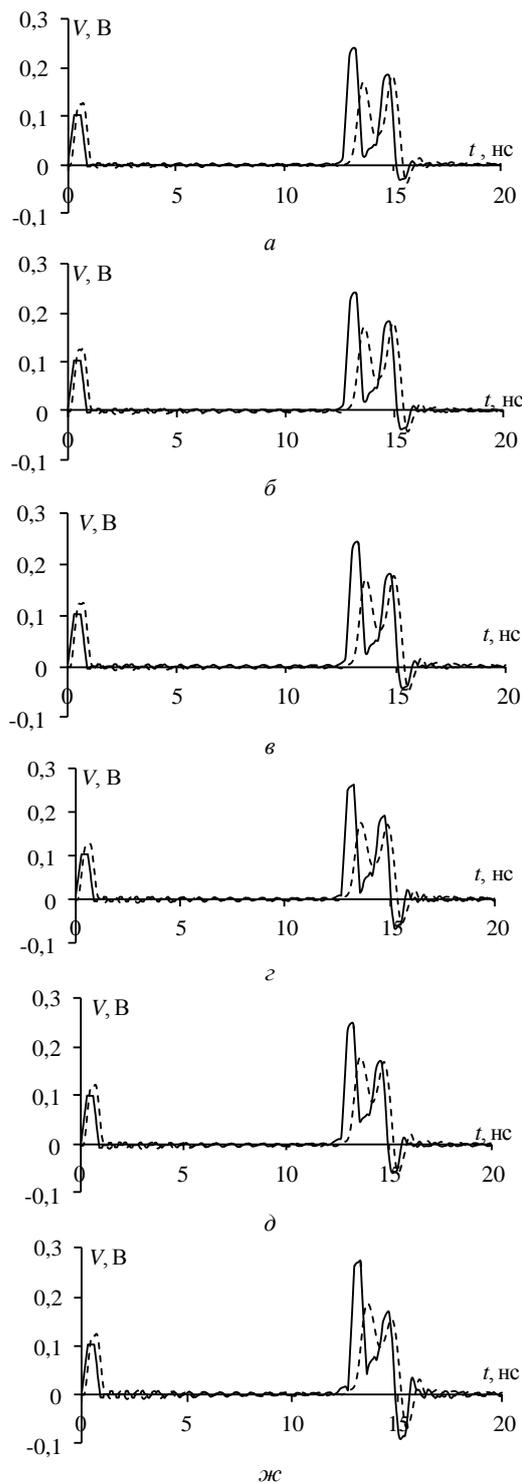


Рис. 6. Формы напряжения на выходе витка по результатам квазистатического (—) и электродинамического (---) моделирования для набора параметров: 1 – а и 6 – б; 2 – в и 7 – г; 3 – д и 8 – ж

Из всех форм напряжения видно, что амплитуда импульса  $l$  при электродинамическом моделировании выше в среднем на 15–20%. Это различие объяснить однозначно сложно, поскольку импульс пе-

рекрестной наводки не распространяется вдоль витка, а отражения, потери и дисперсия практически не оказывают влияния на него. Одной из возможных причин является более строгий учет связи между проводниками. Отклонение времени прихода импульса 2 вызвано наличием проводных отводов (одиночный отрезок) электродинамической модели. Амплитуды импульсов 2 и 3 при электродинамическом моделировании, напротив, ниже, чем при квазистатическом.

Потери при электродинамическом моделировании оказывают более существенное влияние на импульс 2, а при квазистатическом – на 3. Примечательно, что при квазистатическом моделировании амплитудой именно импульса 2 определялась максимальная амплитуда сигнала на выходе. Кроме того, задержка импульсов 2 и 3 увеличивается (увеличение до 0,5 нс), а разность задержек уменьшается, что приводит к наложению этих импульсов. Влияние на увеличение задержки оказывает затягивание фронтов и спадов импульсов, характерное для реальных межсоединений печатных плат. Это приводит не только к увеличению задержки, но и к сглаживанию формы импульсов, из-за чего она близка к треугольной. Таким образом, полноволновой анализ дает более существенное ослабление амплитуды СКИ. Все это объясняется учетом высших типов волн при моделировании, а также влиянием потерь, дисперсии и отражений.

Теперь оценим влияние расстояния между развязывающим и сигнальным проводниками ( $s_2$ ). Из всех форм сигнала видно, что уменьшение  $s_2$  ведет к неоднозначным результатам: к уменьшению разности задержек импульсов и уменьшению амплитуды импульса 3. Наложение импульсов 2 и 3 приводит к последовательному росту амплитуды импульса 2 так, что уже она определяет амплитуду выходного сигнала, что наглядно видно на рис. 6, ж. Для наглядности в табл. 4 сведены амплитуды сигнала на выходе витка для рассмотренных наборов при моделировании разными подходами.

Таблица 4  
Амплитуда (мВ) сигнала в конце линии при моделировании разными подходами

№ набора	1	2	3	6	7	8
Квазистатический	241	244	251	242	247	259
Электродинамический	184	179	181	181	175	187

Из табл. 4 видно, что результаты моделирования двумя подходами отличаются на 23–29%, а амплитуда сигнала для наборов 1–3 и 6–8 не превышает 187 мВ (ослабление более 3 раз). Таким образом, в результате полноволнового моделирования подтверждаются полученные при квазистатическом моделировании закономерности подавления СКИ и выявленные оптимальные наборы параметров. Использование одного из наборов позволит уменьшить габариты витка на плате с сохранением свойств ослабления СКИ. Однако более предпочтительны наборы 6–8, поскольку при близком ослаблении позволяют

обеспечить меньшую ширину устройства. Её максимальное уменьшение соответствует набору 8 и составило 30,6 мм (45% от исходной ширины 67,3 мм).

### Заключение

Представлены результаты комплексного анализа искажений СКИ на выходе модифицированного макета витка меандровой линии. Сначала оценены значения  $K_C$  и  $K_L$  для проводников неосновного витка при добавлении развязывающего проводника для 10 наборов параметров. Показан рост коэффициентов  $K_C$  и  $K_L$  в 7,65–17,9 раза и в 2,5–5 раз соответственно. В результате выявлены наборы, обеспечивающие оптимальные коэффициенты  $K_C$  и  $K_L$ . Затем представлены результаты квазистатического моделирования с учетом и без учета потерь в проводниках и диэлектрике. В результате выявлено, что из-за потерь амплитуда сигнала на выходе витка может уменьшаться в среднем на 5–10%, а для отдельного набора – до 17%. Также, представлены результаты электродинамического моделирования с учетом потерь, которые подтвердили выявленные ранее закономерности. Отличие амплитуд импульсов, полученных двумя подходами, составило 50–70 мВ (до 23–29%). Выявлено, что из-за потерь и уменьшения расстояния между развязывающим и сигнальным проводниками ( $s_2$ ) основного витка амплитуда сигнала на выходе уже определяется амплитудой третьего импульса и не превышает 190 мВ. В результате моделирования показано, что лишь три набора параметров являются оптимальными, а максимальное уменьшение ширины исследуемого макета возможно на 45% от исходной.

Квазистатическое моделирование поддержано грантом Президента РФ МК-396.2022.4.

### Литература

1. Фоминич Э.Н. Электромагнитный терроризм. Новая угроза для информационно-управляющих систем // Военный инженер. – 2016. – № 2 (2). – С. 10–17.
2. Егоров А.Б. Воздействие мощного электромагнитного излучения на радиоэлектронные средства / А.Б. Егоров, А.М. Сотников, И.Ф. Рыбалко // Сборник науч. тр.: ДониЖТ. – 2012. – № 29. – С. 49–54.
3. Здухов Л.Н. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л.Н. Здухов, Л.Н. Парфёнов, О.А. Тарасов // Технологии ЭМС. – 2018. – № 2(65). – С. 22–34.
4. Krzikalla R. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses / R. Krzikalla, T. Weber, L. ter Haseborg // Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC, Istanbul, Turkey. – 2003. – P. 1313–1316.
5. Weber T. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses / T. Weber, R. Krzikalla, L. ter Haseborg // IEEE Trans. on EMC. – 2004. – № 3(36). – P. 423–430.
6. Krzikalla R. Systematic description of the protection capability of protection elements / R. Krzikalla, J. Luiken, L. ter Haseborg // Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC, Honolulu, HI, USA. – 2007. – P. 1–4.
7. Cui Q. Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection / Q. Cui, S. Dong, Y. Han // IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC), Bangkok, Thailand, 2012. – P. 3–5.

8. ESD protection design optimization using a mixed-mode simulation and its impact on ESD protection design of power bus line resistance / H. Hayashi, T. Kuroda, K. Kato, K. Fukuda, S. Baba, Y. Fukuda // International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), Tokyo, Japan, 2005. – P. 99–102.

9. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions in Electromagnetic Compatibility. – 2017. – №6(59). – P. 1864–1871.

10. Surovtsev R.S. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // 16th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices, June 29 – July 3, 2015. – P. 175–177.

11. Карри С. Анализ влияния полувитков на сигнал в конце защитной меандровой линии с уменьшенными геометрическими параметрами / С. Карри, А.В. Носов, Р.С. Суровцев // Междунар. науч. конф. ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации «Шарыгинские чтения». – Томск: ТУСУР, 2021. – С. 100–106.

12. Варзин Е.С. Уменьшение габаритов защитной меандровой микрополосковой линии / Е.С. Варзин, Р.С. Суровцев, А.В. Носов // 26-я Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-26–2020», Томск, Россия, 24 ноября, 2020. – Томск, 2020. С. 91–96.

13. Скорняков И.А. Анализ влияния ширины развешивающей трассы на амплитуду перекрестных наводок в связанной двухпроводной линии / И.А. Скорняков, Р.С. Суровцев // Сб. избр. статей междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2021». – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 2. – С. 86–91.

14. Семенов Э.В. Особенности импульсных последовательностей, формируемых фазовыми фильтрами на основе С-секций с периодической характеристикой группового времени запаздывания / Э.В. Семенов, А.Н. Маничкин, Н.Д. Малютин // Радиотехника. – 2006. – № 6. – С. 27–30.

15. Малютин Н.Д. Многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 164 с.

16. Сычев А.Н. Параметры несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком / А.Н. Сычев, Н.Ю. Рудый // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4-1. – С. 7–15.

17. Tsai C. A generalized model for coupled lines and its applications to two-layer planar circuits / C Tsai, K.C. Gupta // IEEE Transactions. – 1992. – Vol. MTT-40. – № 12. – P. 2190–2199.

18. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №. 012110. – P. 1–7.

19. Matthae, G.L. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines / G.L. Matthaei, G.C. Chinn // IEEE. – 1992. – P. 1353–1354.

#### Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»

Томского государственного ун-та

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

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

ORCID: 0000-0001-6609-0449

Тел.: +7 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: surovtsvrs@gmail.com

#### Скорняков Иван Анатольевич

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа

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

Тел.: +7-996-937-76-57

Эл. почта: ivan\_sk94@mail.ru

#### Карри Салим

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа

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

Тел.: +7-923-411-06-01

Эл. почта: karrisalim.h@gmail.com

Surovtsev R.S., Skorniyakov I.A., Karri S.

#### Propagation of ultrashort pulse in a model of a turn of a microstrip line folded into a meander with guard conductors

The possibility of reduction of the required space on the PCB of a meander line turn model with the maintenance of its protective properties through the use of guard conductors is studied. As a result of quasi-static and electrodynamic simulating, regularities of USP attenuation are revealed. As a result, the possibility to reduce the width of the device by 45% of the initial one with 3 times attenuation is shown.

**Keywords:** noise protection, meander line, ultrashort pulse.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-14-20

#### References

1. Fominich E.N. [Electromagnetic terrorism. A new threat to information and control systems]. *Military Engineer*, 2016, no. 2 (2), pp. 10–17 (in Russ.).

2. Egorov A.B., Sotnikov A.M., Rybalko I.F. [The impact of powerful electromagnetic radiation on radio-electronic means]. *Collection of Scientific Works of DonIzht*, 2012, no. 29, pp. 49–54 (in Russ.).

3. Zdukhov L.N., Parfënov L.N., Tarasov O.A. [Three possible mechanisms for the occurrence of electronic devices failures as a result of electromagnetic influence]. *Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2018, no. 2(65), pp. 22–34 (in Russ.).

4. Krzikalla R., Weber T., Ter Haseborg L. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses. *Proc. of IEEE International EMC Symposium*, Istanbul, Turkey, 2003, pp. 1313–1316.

5. Weber T., Krzikalla R., Ter Haseborg L. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, no. 3(36), pp. 423–430.

6. Krzikalla R., Luiken J., Ter Haseborg L. Systematic description of the protection capability of protection elements. *Proceedings of IEEE International EMC Symposium*, Honolulu, HI, USA, 2007, pp. 1–4.

7. Cui Q., Dong S., Han Y. Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection. *IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC)*, Bangkok, Thailand, 2012, pp. 3–5.

8. Hayashi H., Kuroda T., Kato K., Fukuda K., Baba S., Fukuda Y. ESD protection design optimization using a mixed-mode simulation and its impact on ESD protection design of power bus line resistance. *International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices(SISPAD)*, Tokyo, Japan, 2005, pp. 99–102.

9. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line. *IEEE Transactions in Electromagnetic Compatibility*, 2017, no. 6(59), pp. 1864–1871.

10. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, June 29 – July 3, 2015, pp. 175–177 (in Russ.).

11. Karri S., Nosov A.V., Surovtsev R.S. *Analiticheskiy analiz poluvitkov na signal v kontse zashchitnoy meandrovoy linii s umen'shennymi geometricheskimi parametrami*. [Analysis of the effect of half-turns on the signal at the end of a protective meander line with reduced geometric parameters]. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya vedushchikh nauchnykh shkol v oblasti radiolokatsii, radionavigatsii i radioelektronnykh sistem peredachi informatsii «Sharyginskiye chteniya» [International scientific conference of leading scientific schools in the field of radar, radio navigation and radio-electronic information transmission systems (Sharygin Readings)]*, 2021 (in Russ.).

12. Varzin E.S., Surovtsev R.S., Nosov A.V. *Umen'sheniye gabaritov zashchitnoy meandrovoy mikropoloskovoy linii*. [Reducing the dimensions of the protective meander microstrip line]. 26-ya Mezhd. nauch.-prakt. konf. «Prirodnyye i intellektual'nyye resursy Sibiri. SIBRESURS-26-2020» [26th. Int. scientific-practical. conf. «Natural and intellectual resources of Siberia. SIBRESOURCE-26-2020», Tomsk, November 24, 2020. pp. 91–96 (in Russ.).

13. Skornyakov I.A., Surovtsev R.S. *Analiz vliyaniya shiriny razvyazyvayushchey trassy na amplitudu perekrestnykh navodok v svyazannoy dvukhprovodnoy linii*. [Analysis of the influence of the width of the decoupling route on the amplitude of crosstalk in a coupled two-wire line]. *Sbornik izbrannykh statey mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Nauchnaya sessiya TUSUR–2021»* [Collection of selected articles of the international scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists «TUSUR Scientific session –2021»], Tomsk, 2021, part 2, pp. 86–91 (in Russ.).

14. Semenov E.V., Manichkin A.N., Malyutin N.D. [Features of pulse sequences formed by phase filters based on C-sections with a periodic characteristic of the group delay time]. *Radio Engineering*, 2006, no. 6, pp. 27–30 (in Russ.).

15. Malyutin N.D. *Mnogosvyaznyye poloskovyye struktury i ustroystva na ikh osnove* [Multiconnected strip structures and devices based on them]. Tomsk: Publishing House Vol. university, 1990, 164 p. (in Russ.).

16. Sychev A.N., Rudy N.Yu. Parameters of asymmetric coupled lines with an inhomogeneous dielectric, *Proceedings of TUSUR University*, 2018, T. 21, no. 4-1, pp. 7–15 (in Russ.).

17. Tsai C., Gupta K.C. A generalized model for coupled lines and its applications to two-layer planar circuits, *IEEE Transactions*, 1992, vol. MTT-40, no. 12, pp. 2190–2199.

18. Kuksenko S.P. Preliminary results of a project of the University of TUSUR on designing the distribution network space vehicles: modeling EMC. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, no. 012110, pp. 1–7.

19. Matthaei, G.L., Chinn G.C. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines, *IEEE*, 1992, pp. 1353–1354.

---

#### Roman S. Surovtsev

Candidate of Science in Engineering, Senior researcher, Research Laboratory «BEMS RES», Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-6609-0449  
Phone: +7 (382-2) 41-34-39  
Email: surovtssevs@gmail.com

#### Ivan A. Skornyakov

Postgraduate student, Department of Television and Control, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-996-937-76-57  
Email: ivan\_sk94@mail.ru

#### Salim Karri

Postgraduate student, Department of Television and Control, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-923-411-06-01  
Email: karrisalim.h@gmail.com

УДК 621.382.2/.3: 681.518.5

Ю.А. Шурыгин, С.В. Ишуткин, Б.В. Ширяев, Ю.С. Жидик

## Изготовление электрооптических модуляторов на основе InP для ВОЛС и проведение автоматизированного визуального контроля их поверхности на предмет наличия дефектов

Электрооптические модуляторы являются ключевыми элементами при построении волоконно-оптических линий связи. В работе представлены результаты разработки технологии изготовления электрооптических модуляторов Маха–Цендера на основе фосфида индия (InP). Разработанная технология была апробирована при изготовлении тестовых образцов электрооптических модуляторов с последующим проведением визуального контроля наличия дефектов на их поверхности в автоматизированном режиме с использованием разработанного и реализованного авторами алгоритма.

**Ключевые слова:** оптоэлектроника, электрооптический модулятор, фосфид индия, реактивное ионное травление, VCB, pin-диод, визуальный контроль, детектирование дефектов.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-21-27

Радиофотонные микросхемы находят широкое применение в средствах распознавания и зондирования, оптических средствах связи, средствах обработки оптических сигналов, биофотонике, телекоммуникационных сетях, средствах подключения к интернету и передачи данных, быстродействующей вычислительной технике и т.п. Одним из основных драйверов развития радиофотоники является рынок телекоммуникации [1, 2]. Пересылка все большего объема данных между пользователями, сохранение и скачивание их на удаленных серверах центров обработки данных – основной первичный источник нагрузки на магистральные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), при построении которых одними из ключевых элементов являются электрооптические модуляторы (ЭОМ).

При создании интегральных оптоэлектронных устройств InP является одним из базовых материалов, позволяющих создавать как активные, так и пассивные элементы [3]. Ряд производителей уже освоил промышленное производство электрооптических модуляторов на основе InP. Тем не менее разработка и оптимизация технологии изготовления таких устройств продолжают.

В современном производстве полупроводниковых приборов помимо задач их непосредственного изготовления важным является осуществление большого количества операций контроля их выходных параметров по косвенным, вторичным или непосредственным признакам [4, 5]. Неотъемлемой частью технологического контроля является контроль внешнего вида выпускаемой продукции на предмет отсутствия повреждений и загрязнений, точности повторения фотошаблона и др. [6]. Визуальный контроль часто проводится вручную, и, как следствие, данный этап отнимает много времени оператора и увеличивает себестоимость выпускаемой продукции. Решением данной проблемы является применение программного продукта, способного по полученным в автоматическом режиме микрофотографиям определять годность полупроводниковых приборов с большой скоростью.

Целью данной работы является разработка технологии изготовления электрооптического модулятора Маха–Цендера на основе InP с изготовлением опытных образцов модуляторов и осуществление автоматизированного визуального контроля их поверхности на предмет дефектов с использованием разработанного авторами алгоритма.

### Структурная схема ЭОМ

Структурная схема изготавливаемого ЭОМ Маха–Цендера на основе InP представлена на рис. 1 [7].

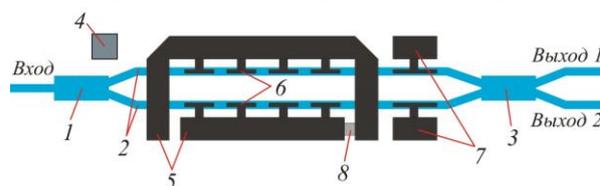


Рис. 1. Структурная схема ЭОМ Маха–Цендера на основе InP:

- 1 – оптический делитель; 2 – оптические волноводы;
- 3 – оптический сумматор; 4 – электрод смещения;
- 5 – электроды управления; 6 – секции электродов управления; 7 – электроды подстройки; 8 – резистор

В основе данного модулятора используется интерферометр Маха–Цендера, позволяющий выполнять амплитудную модуляцию оптического сигнала за счет управления фазовой скоростью оптических волн в каналах (плечах) интерферометра. На оптический вход модулятора подается постоянный оптический сигнал. Далее он попадает на интерферометр Маха–Цендера, состоящий из оптического делителя (см. рис. 1, поз. 1), двух оптических волноводов (плечи интерферометра, см. рис. 1, поз. 2) и оптического сумматора (см. рис. 1, поз. 3). Модулирующий СВЧ-сигнал поступает на электрический вход модулятора (см. рис. 1, поз. 5). Модулированный оптический сигнал снимается с оптических выходов. Модулирование амплитуды оптического сигнала осуществляется за счет управления фазовой скоростью световых волн в плечах интерферометра, что обеспечивается локальным изменением коэффициента преломления волноводов. В ЭОМ на основе InP для

этого используют квантово-размерный эффект Штарка [3]. Технически изменение коэффициента преломления осуществляется подачей напряжения смещения на  $p-i-n$ -структуру в области каналов интерферометра (см. рис. 1, поз. 6). Для обеспечения работы модулятора в широком диапазоне частот управляющие электроды формируются в виде электродов бегущей волны. Задание режима работы модулятора обеспечивается подачей напряжения на электрод смещения (см. рис. 1, поз. 4). Электроды подстройки (см. рис. 1, поз. 7) используются для коррекции рабочей точки модулятора [8].

#### Методика эксперимента

Для изготовления ЭОМ Маха–Цендера в работе были использованы 3 дюймовые полуизолирующие подложки InP со сформированной на их поверхности  $p-i-n$ -InP/InGaAsP-гетероструктурой. Области гетероструктуры  $p$ -InP и  $n$ -InP были сформированы с переменным профилем легирования. Область  $p$ -InP была легирована Zn с максимальным уровнем легирования  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , область  $n$ -InP была легирована Si с максимальным уровнем легирования  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . В  $i$  области  $p-i-n$ -структуры была сформирована MQW на основе InP/InGaAsP сверхрешетки общей толщиной 400 нм.

Создание ЭОМ на основе InP требует формирования волноводных структур с высоким аспектным соотношением и гладкой морфологией поверхности, при этом ширина формируемых элементов может быть менее 1 мкм [9, 10]. Поэтому в работе формирование элементов волноводов модулятора выполнялось методом реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме с использованием газовой смеси  $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{N}_2$  10/20/20  $\text{см}^3/\text{мин}$  по описанный в [11] технологии и откорректированной с учетом необходимости удаления образующегося в процессе травления соединения  $\text{InCl}_3$ , обладающего низкой летучестью [12–14]. Величина мощности индуктивного разряда  $P_{\text{ICP}}$  составляла 700 Вт, мощности приложенной между электродами  $P_{\text{RF}}$  100 Вт, давление в процессе травления 15 мТорр. Травление слоев гетероструктуры выполнялось по однослойной диэлектрической маске. Для этого на поверхность подложек методом плазмохимического осаждения из газовой фазы осаждалась пленка  $\text{SiN}_x$  требуемой толщины. Формирование элементов топологии в диэлектрике выполнялось методом реактивного ионного травления в плазме на основе  $\text{SF}_6$  по однослойной маске фоторезиста.

Омические контакты к  $p$ -InGaAs- и  $n$ -InP-слоям гетероструктуры формировались методом электронно-лучевого испарения на основе металлизаций Ti/Pt/Au (50/25/400 нм) и Ni/Ge/Au (10/30/200 нм) соответственно. Отжиг омических контактов проводился на горячей плите в инертной среде.

Планаризация рельефа на поверхности подложки выполнялась с использованием пленки фоточувствительного бензоциклобутена (BCB). После полимеризации удаление избыточной толщины пленки BCB выполнялось с использованием реактивного

ионного травления в индуктивно-связанной плазме с использованием газовой смеси  $\text{SF}_6/\text{O}_2$ .

Тонкопленочные резисторы NiCr формировались методом электронно-лучевого испарения. Межэлементная металлизация формировалась методом электрохимического осаждения пленки Au толщиной 3 мкм. В качестве подслоя для осаждения Au была использована двухслойная композиция Ti/Au 30/80 нм, получаемая методом электронно-лучевого испарения.

Для получения микроскопических изображений элементов модулятора использовались методы оптической и сканирующей электронной микроскопии.

После изготовления ЭОМ на полупроводниковой пластине InP производилась оценка степени их дефектности с использованием разработанного авторами алгоритма автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем на основе метода вычисления пиксельного расстояния [15].

В общем случае алгоритм оценки степени дефектности монолитных интегральных схем построен на качественном сравнении фотошаблона (далее – чертеж) и ее микрофотографии. Алгоритм анализирует разницу между ними, вызванную особенностями технологий изготовления и контроля: искаженная форма элементов, ошибки совмещения слоев, механические повреждения, оптические ошибки и погрешности микроскопии и др.

Выполняется алгоритм автоматизированного визуального контроля с использованием метода вычисления пиксельного расстояния по следующей последовательности:

- 1) поиск предварительно настроенных точек совмещения;
- 2) вычисление матрицы аффинного преобразования;
- 3) растеризация векторного чертежа с заливкой областей;
- 4) выделение области анализа из микрофотографии и растрованного чертежа;
- 5) преобразование выделенной области анализа микрофотографии монолитной интегральной схемы с использованием классификатора на основе искусственной нейронной сети;
- 6) вычисление карты дефектности, представляющей матрицу пиксельных расстояний от каждого пикселя области анализа чертежа до ближайшего пикселя преобразованной микрофотографии той же принадлежности;
- 7) определение наличия дефекта по карте дефектности.

Результатом работы алгоритма является карта дефектности монолитной интегральной схемы в масштабе микрофотографии, отображающая дефектные участки.

#### Изготовление ЭОМ

Технологический маршрут изготовления ЭОМ состоял из следующей последовательности технологических блоков:

- формирование диэлектрической маски  $\text{SiN}_x$  для травления волноводов (рис. 2, а);

- плазмохимическое травление *p*-слоев гетероструктуры по маске SiN<sub>x</sub> (см. рис. 2, б);
- удаление диэлектрической маски SiN<sub>x</sub> с пассивных элементов электрооптического тракта (см. рис. 2, в);
- плазмохимическое травление *p*- и *i*-слоев гетероструктуры по маске SiN<sub>x</sub> (см. рис. 2, з);
- формирование диэлектрической маски SiN<sub>x</sub> и последующее плазмохимическое травление *n*-слоев гетероструктуры для формирования межэлементной изоляции (см. рис. 2, д);
- формирование омического контакта Ni/Ge/Au к *n*-InP слою гетероструктуры (см. рис. 2, е);

- планаризация поверхности подложки пленкой BCB (см. рис. 2, ж);
- утонение пленки BCB и удаление SiN<sub>x</sub> в окнах BCB плазмохимическим травлением;
- формирование омических контактов Ti/Pt/Au к *p*-InGaAs слою гетероструктуры и NiCr тонкопленочных резисторов (см. рис. 2, з);
- формирование межэлементной металлизации Ti/Au (см. рис. 2, и).

Топология изготавливаемого ЭОМ была спроектирована с применением подхода многопараметрической оптимизации ЭОМ на основе InP, изложенного в [7].

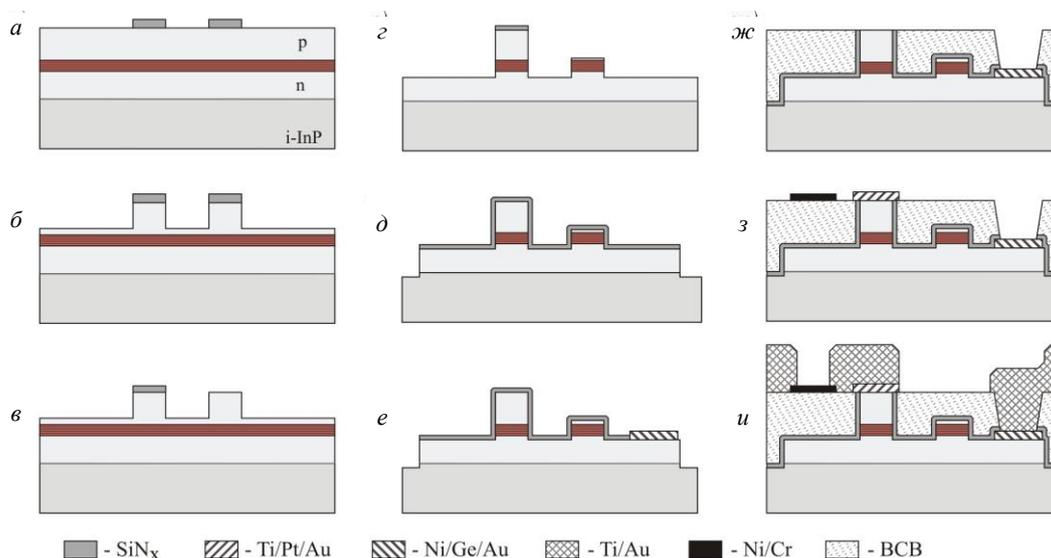


Рис. 2. Технологический маршрут изготовления ЭОМ Маха–Цендера на основе InP

На рис. 3 представлены микроскопические изображения элементов электрооптического тракта модуляторов после этапа формирования межэлементной изоляции. Элементы волноводов имели профиль, близкий к прямоугольному, и гладкую морфологию поверхности.

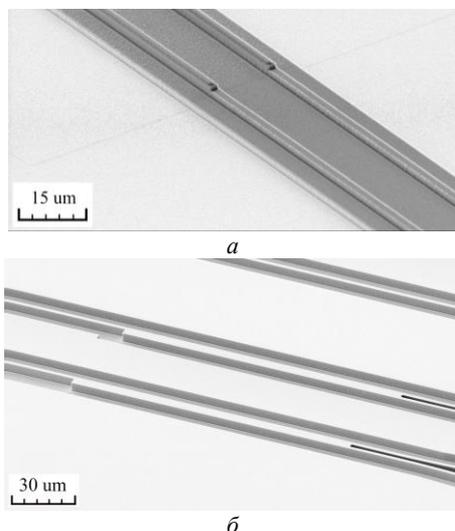


Рис. 3. Микроскопические изображения элементов электрооптического тракта ЭОМ на основе InP: а – отрезок фазосдвигающей секции; б – ММИ-делители

Далее на подложке были сформированы омические контакты *n*-InP-областям *p*-*i*-*n*-диодов модулятора. После отжига на плите металлизации Ni/Ge/Au (10/30/200 нм) при температуре 410 °C в течение 2 мин приведенное контактное сопротивление омического контакта составило  $1,2 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>.

Следующим этапом осуществлялась планаризация поверхности подложки пленкой BCB. После травления в плазме SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> пленка BCB имела гладкую морфологию поверхности. Разнотолщинность пленки по поверхности подложки диаметром 3 дюйма не превышала 0,2 мкм.

Далее на подложке были сформированы верхние омические контакты *p*-*i*-*n*-диодов модулятора к *p*-InGaAs-областям. Оптимальным режимом отжига стал нагрев омических контактов до 300 °C в течение 10 мин, при этом достигается минимальное значение приведенного контактного сопротивления  $5,7 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>. Отжиг омических контактов на подложках с планаризацией пленкой BCB показал отсутствие как деформации, так и растрескивания планаризирующего покрытия.

На рис. 4 представлено микроскопическое изображение отрезка металлизации Ti/Au. На рисунке видны внешние электроды и секции внутренних электродов электрически соединенных с *p*-контактами *p*-*i*-*n*-диодов фазосдвигающей секции

ЭОМ. Как видно из рисунка, слой ВСВ обеспечивает достаточный уровень планаризации поверхности подложки.

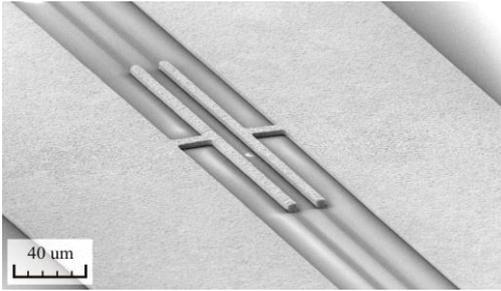


Рис. 4. Микроскопическое изображение отрезка микрополосковой линии на основе металлизации Ti/Au

На рис. 5 представлена фотография полупроводниковой пластины с изготовленными ЭОМ.

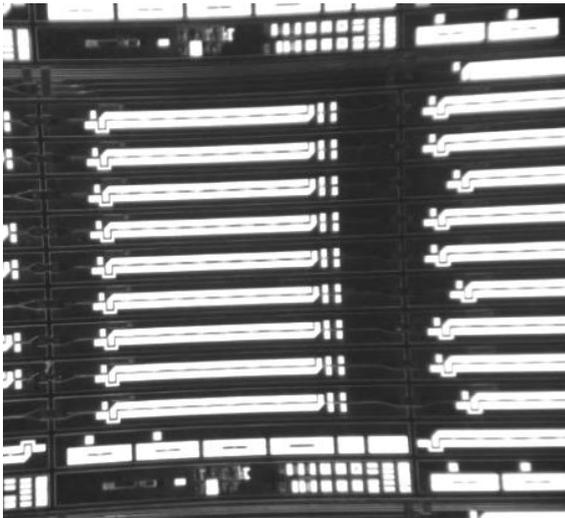


Рис. 5. Фотография участка полупроводниковой пластины с ЭОМ на основе InP

#### Автоматизированный визуальный контроль поверхности ЭОМ на предмет наличия дефектов

После изготовления ЭОМ с использованием разработанного и реализованного авторами алгоритма автоматизированного визуального контроля был проведен визуальный контроль поверхности модуляторов на предмет наличия дефектов.

Отличительной особенностью в работе алгоритма при визуальном контроле дефектов ЭОМ является настройка оптимальных параметров работы алгоритма. Это вызвано тем, что электрооптические модуляторы обладают значительно большими габаритными размерами кристалла (9,0×0,55 мм) по сравнению с ранее анализируемыми в [14] кристаллами СВЧ-монокристаллических интегральных схем. При этом ЭОМ содержит в своем составе элементы шириной менее 1 мкм.

К особенностям настройки алгоритма для проведения автоматизированного визуального контроля можно отнести следующие:

- использование 5 точек совмещения для оценки качества разработанного алгоритма коррекции набора точек совмещения при вычислении коэффициентов матрицы аффинного преобразования фотошаблона;
- ограничение области анализа топологией фазового модулятора для исключения ошибок при детектировании дефектов на границах кристалла;
- использование векторного фотошаблона группового исполнения для упрощения и ускорения настройки алгоритма;
- расширение диапазонов параметров исследования из-за существенного увеличения разрешения изображения.

Наличие на одной полупроводниковой пластине нескольких топологий электрооптического модулятора существенно упростило процесс настройки алгоритма для проведения автоматизированного визуального контроля, так как при изменении топологии требуется только настройка процесса совмещения фотошаблона и микрофотографии. Все остальные настройки (настройки искусственной нейронной сети, выделение области анализа, установка параметров ускорения поиска точек совмещения и др.) остаются неизменными.

Подробный пример результата работы алгоритма амортизированного визуального контроля поверхности кристалла ЭОМ приведен на рис. 6. На рис. 6, а и в изображены микрофотография годного кристалла ЭОМ и растриванный чертеж его топологии соответственно. Микрофотография тестируемого кристалла ЭОМ с дефектами на поверхности представлена на рис. 6, б. После ограничения области анализа микрофотографии бракованного кристалла ЭОМ топологией фазового модулятора для исключения ошибок при детектировании дефектов на границах кристалла (см. рис. 6, з) осуществляется вычисление карты дефектности. Результатом работы алгоритма является визуализированная карта дефектности в масштабе микрофотографии, отображающая дефектные участки исследуемого кристалла ЭОМ (см. рис. 6, д). Для удобства анализа результатов алгоритм позволяет выделить дефекты исследуемого кристалла ЭОМ (см. рис. 6, е).

Проведенный автоматизированный визуальный контроль сформированных ЭОМ на основе метода вычисления пиксельного расстояния показал удовлетворительную работу алгоритма. Повторяемость автоматизированного визуального контроля внешнего вида кристалла ЭОМ и ручного визуального контроля составила более 80%.

В целом проведение автоматизированного визуального контроля микрофотографий ЭОМ, изготовленных на полупроводниковой пластине диаметром 3 дюйма (рис. 5), показало наличие дефектных участков (повреждение металлизации, остатки фоторезиста и т.д.) на поверхности 16% кристаллов ЭОМ от общего изготовленного количества на полупроводниковой пластине.

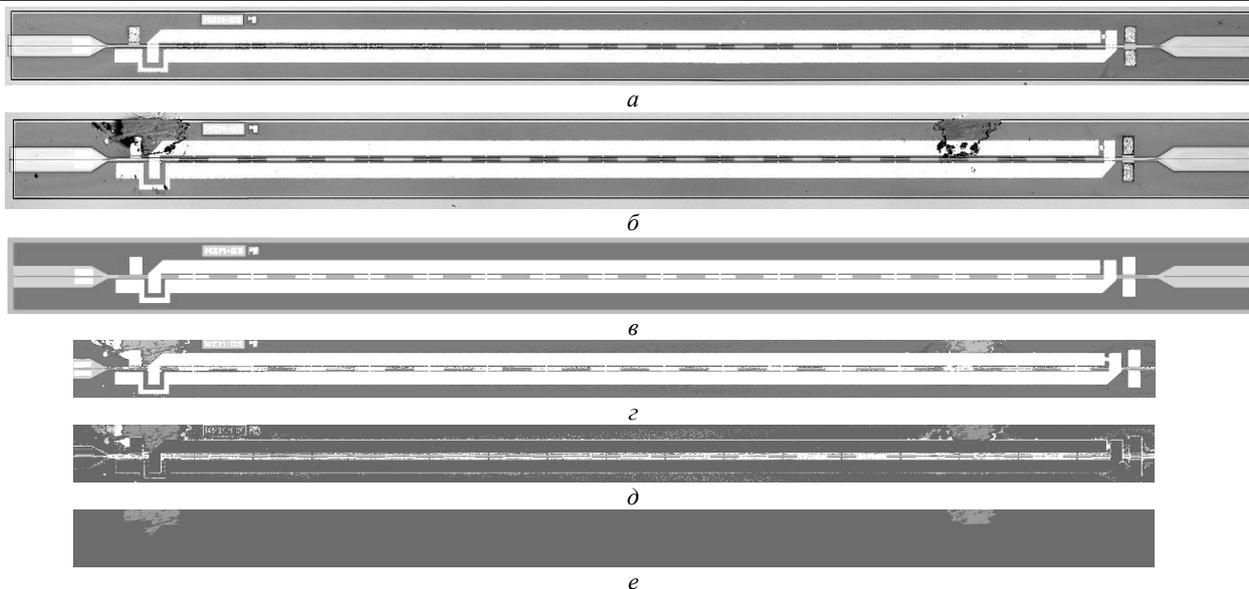


Рис. 6. Пример результата работы алгоритма амортизированного визуального контроля поверхности ЭОМ: а – микрофотография годного кристалла ЭОМ; б – микрофотография бракованного кристалла ЭОМ с дефектами; в – растринрованное изображение фотошаблона; г – преобразованная область анализа микрофотографии бракованного кристалла ЭОМ с дефектами; д – карта дефектности бракованного кристалла ЭОМ; е – выделенные дефекты бракованного кристалла ЭОМ

### Заключение

В рамках работы была разработана технология изготовления электрооптических модуляторов Маха–Цендера на основе InP. Показана возможность формирования омического  $p$ -контакта Ti/Pt/Au к  $p$ -InGaAs-слою после планаризации поверхности подложки пленкой ВСВ. При этом после отжига омического контакта деформация и растрескивание планаризирующей пленки ВСВ отсутствовали.

Показано, что при настройке оптимальных параметров работы разработанного авторами алгоритма автоматизированного визуального контроля поверхности кристаллов монолитных интегральных схем алгоритм с высокой достоверностью позволяет выявлять наличие дефектных участков кристаллов электрооптических модуляторов Маха–Цендера. Проведение автоматизированного визуального контроля микрофотографий изготовленных электрооптических модуляторов выявило наличие дефектных участков на поверхности 16% кристаллов.

Работа выполнена коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-03-2020-237/1 от 05 марта 2020 г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040), а также с поддержкой в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030». Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» (регистрационный номер 200568).

### Литература

1. Cisco Annual Internet Report. Available online: Cisco Annual Internet Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>, свободный (дата обращения: 19.09.2022).

2. NOKIA Who Will Satisfy the Desire to Consume? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://readymag.com/BellLabs/480968/>, свободный (дата обращения: 19.09.2022).

3. Status and progress in InP optoelectronic processing: Toward higher levels of integration / J.L. Pleumeekers, R.P. Schneider, A. Mathur, S.K. Hurtt, P.W. Evans, A.G. Dentai, C.H. Joyner, D.J.H. Lambert, S. Murthy, R. Muthiah // Proceedings of the International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology. – Vancouver: CS Mantech, 2006. – P. 115–118.

4. Классификатор изображений микросхем при помощи сверточной нейронной сети / С.А. Сарманбетов, А.А. Максимова, Д.М. Жексебай, Е.Т. Кожугулов // Известия НАН РК. Сер.: Физика и информационные технологии. – 2021. – Т. 6, № 340. – С. 59–65.

5. Lee K.B. Convolutional Neural Network for Fault Classification and Diagnosis in Semiconductor Manufacturing Processes / K.B. Lee, S. Cheon, C. Kim // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. – 2017. – Vol. 30, No. 2. – P. 135–142. DOI: 10.1109/TSM.2017.2676245

6. Мишанов Р.О. Визуальный контроль КМОП-микросхем // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: Изд-во ООО «Артель», 2017. – С. 201–203.

7. Multi-Parameter optimization of an InP electro-optic modulator / M. Stepanenko, I. Yunusov, V. Arykov, P. Troyan, Y. Zhidik // Symmetry. – 2020. – Vol. 12, No. 11. – P. 1–18.

8. Optical quantum-confined Stark effect in GaAs quantum wells / D. Fröhlich, R. Wille, W. Schlapp, G. Weimann // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 59, No. 15. – P. 1748–1751.

9. Smit M. Past, present, and future of InP-based photonic integration / M. Smit, K. Williams, J. van der Tol // APL Photon. – 2019. – Vol. 4. – P. 050901.

10. InP-based foundry PICs for optical interconnections / F.M. Soares, M. Baier, T. Gaertner, N. Grote, M. Moehrle, T. Beckerwerth, P. Runge, M. Schell // Appl. Sci. – 2019. – Vol. 9. – P. 1588.

11. Плазмохимическое травление InP/InGaAs гетероструктуры в индуктивно связанной плазме Cl<sub>2</sub>/Ar/N<sub>2</sub> для

формирования оптических волноводных структур / С.В. Ишуткин, В.С. Арыков, Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 28–32.

12. A widely-tunable high-speed transmitter using an integrated SGDBR laser-semiconductor optical amplifier and Mach-Zehnder modulator / J.S. Barton, E.J. Skogen, M.L. Masanovic, S.P. Denbaars, L.A. Coldren // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2003. – Vol. 9. – P. 1113–1117.

13. Indium phosphide photonic integrated circuits for free space optical links / H. Zhao, S. Pinna, B. Song, L. Megalini, S.T.S. Brunelli, L.A. Coldren // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2018. – Vol. 24. – P. 1–6.

14. Ozaki J. High-speed modulator for next-generation large-capacity coherent optical networks // J. Ozaki, Y. Ogiso, S. Nakano // Ntt Tech. Rev. – 2018. – Vol. 16. – P. 1–8.

15. Ширяев Б.В. Алгоритм автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем с использованием искусственных нейронных сетей / Б.В. Ширяев, А.Ю. Ющенко, А.В. Безрук // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 72–76.

#### Шурыгин Юрий Алексеевич

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании  
Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-8819-0694  
Тел.: + 7 (382-2) 51-05-30  
Эл. почта: office@tusur.ru

#### Ишуткин Сергей Владимирович

Канд. техн. наук, вед. н.с. лаб. интегральной оптики и радиофотоники (ЛИОР) каф. физической электроники (ФЭ) ТУСУР  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-4468-346X  
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61  
Эл. почта: ishsv@mail.ru

#### Ширяев Борис Владимирович

М.н.с. ЛИОР каф. ФЭ ТУСУР  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-7367-9021  
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61  
Эл. почта: harger.net@mail.ru

#### Жидик Юрий Сергеевич

Канд. техн. наук, вед. н.с. ЛИОР каф. ФЭ ТУСУР  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-7803-2086  
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61  
Эл. почта: zhidikyur@mail.ru

Shurygin Yu.A., Ishutkin S.V., Shiryayev B.V., Zhidik Y.S.

#### Manufacture of InP-based electro-optical modulators for FOCL and automated visual inspection of their surface for defects

Electro-optical modulators are key elements in the construction of fiber-optic communication lines. In this work, the authors developed a technology for manufacturing Mach-Zehnder

electro-optical modulators based on InP. The developed technology was tested while manufacturing test samples of electro-optical modulators. The defects on the surface of the samples were visually inspected in an automated mode using the algorithm developed by the authors.

**Keywords:** optoelectronics, electro-optical modulator, indium phosphide, reactive ion etching, HCB, pin diode, visual inspection, defect detection.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-21-27

#### References

1. Cisco Annual Internet Report. Available online: Cisco Annual Internet Report. Available at: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (Accessed: September 19, 2022).

2. NOKIA Who Will Satisfy the Desire to Consume? Available at: <https://readymag.com/BellLabs/480968/> (Accessed: September 19, 2022).

3. Pleumeekers J.L., Schneider R.P., Mathur A., Hurtt S.K., Evans P.W., Dentai A.G., Joyner C.H., Lambert D.J.H., Murthy S., Muthiah R. Status and progress in InP optoelectronic processing: Toward higher levels of integration. *Proceedings of the International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology. Vancouver: CS Man-tech*, 2006, pp. 115–118.

4. Sarmanbetov S.A., Maksutova A.A., Zheksebay D.M., Kozhagulov E.T. [Classifier of microcircuit images using a conventional neural network]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physics and Information Technology Series*, 2021, vol. 6, no. 340, pp. 59–65 (in Russ.).

5. Lee K.B., Cheon S., Kim C. Convolutional Neural Network for Fault Classification and Diagnosis in Semiconductor Manufacturing Processes. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 135–142.

6. Mishanov R.O. Vizual'nyy kontrol' KMOP-mikroskhem [Visual inspection of CMOS chips]. Aktual'nyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy. Materialy vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Actual problems of radio electronics and telecommunications. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Samara, Artel LLC Publ., 2017, pp. 201–203 (in Russ.).

7. Stepanenko M., Yunusov I., Arykov V., Troyan P., Zhidik Y. Multi-Parameter optimization of an InP electro-optic modulator. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no 11, pp. 1–18.

8. Fröhlich D., Wille R., Schlapp W., Weimann G. Optical quantum-confined Stark effect in GaAs quantum wells. *Physical Review Letters*, 1987, vol. 59, no 15, pp. 1748–1751.

9. Smit M., Williams K., van der Tol J. Past, present, and future of InP-based photonic integration. *APL Photon*, 2019, vol. 4, pp. 050901.

10. Soares F.M., Baier M., Gaertner T., Grote N., Moehrle M., Beckerwerth T., Runge P., Schell M. InP-based foundry PICs for optical interconnections. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, pp. 1588.

11. Ishutkin S.V., Arykov V.S., Zhidik Y.S., Troyan P.E. [Inductively coupled plasma etching of InP/InGaAs heterostructure for optical waveguide structures]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 28–32 (in Russ.).

12. Barton J.S., Skogen E.J., Masanovic M.L., Denbaars S.P., Coldren L.A. A widely-tunable high-speed transmitter using an integrated SGDBR laser-semiconductor optical amplifier and Mach-Zehnder modulator. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, vol. 9, pp. 1113–1117.

13. Zhao H., Pinna S., Song B., Megalini L., Brunelli S.T.S., Coldren L.A. Indium phosphide photonic integrated circuits for free space optical links. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, vol. 24, pp. 1–6.

14. Ozaki J., Ogiso Y., Nakano S. High-speed modulator for next-generation large-capacity coherent optical networks. *Ntt Tech. Rev.*, 2018, vol. 16, pp. 1–8.

15. Shiryaev B.V., Yushchenko A.Yu., Bezruk A.V. [Algorithm for automated visual inspection of monolithic integrated circuits using neural networks]. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 72–76 (in Russ.).

---

**Yury A. Shurygin**

Doctor of Science in Engineering, Professor,  
Head, Department of Computer Control Systems and Design,  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-8819-0694  
Phone: + 7 (382-2) 51-05-30  
Email: office@tusur.ru

**Sergey V. Ishutkin**

Candidate of Science in Engineering, Leading Researcher  
of Integrated Optics and Microwave Photonics Laboratory  
(LIOMP), TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-48-61  
Email: ishsv@mail.ru

**Boris V. Shiryaev**

Junior Research Fellow, LIOMP, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-7367-9021  
Phone: +7 (382-2) 41-48-61  
Email: harger.net@mail.ru

**Yuriy S. Zhidik**

Candidate of Science in Engineering, LIOMP, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-7803-2086  
Phone: +7 (382-2) 41-48-61  
Email: zhidikyur@mail.ru

УДК 621.365.31

М.В. Храмцов, А.М. Заболоцкий

## Устройства подогрева электронной компонентной базы радиоэлектронной аппаратуры в условиях отрицательных температур

Известно, что современная электронная компонентная база (ЭКБ), применяемая в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) различного назначения, работоспособна только в определенном диапазоне температур. В то же время при разработке РЭА часто предъявляются требования к гарантированной работе в более жестких климатических условиях, в том числе и при воздействии отрицательных температур. В связи с этим необходимо обеспечивать заданные тепловые режимы РЭА. Для этого используют различные устройства подогрева, каждое из которых позволяет обеспечить работу РЭА в условиях воздействия отрицательных температур путем нагрева ЭКБ до рабочей температуры. В работе проведены обзор, сравнительный анализ и даны рекомендации по применению современных устройств подогрева ЭКБ РЭА в условиях воздействия отрицательных температур. Данный материал может быть использован при проектировании РЭА и помочь в обеспечении ее тепловых режимов.

**Ключевые слова:** радиоэлектронная аппаратура, электронная компонентная база, отрицательные температуры, устройства подогрева.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-28-36

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) используется в различных сферах жизнедеятельности человека, в том числе и в таких критичных областях промышленности, как военная, космическая, топливно-энергетическая, атомная и др. Это, в свою очередь, напрямую связано с эксплуатацией РЭА в условиях воздействия отрицательных температур. К таким условиям можно отнести условия Крайнего Севера и Арктики, где температура воздуха опускается намного ниже  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1–3]. Также известно, что воздушные суда могут эксплуатироваться при температуре ниже  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4], что критично для авиационной РЭА. А в условиях космоса температура достигает еще более низких значений [5].

Любая РЭА проектируется на основе электронной компонентной базы (ЭКБ). Виды категории исполнения ЭКБ иностранного производства разделяются на Space, Military, Industrial, Commercial [6]. При этом каждое исполнение имеет свой диапазон рабочих температур [7], который изменяется от  $-55$  до  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На территории Российской Федерации виды климатического исполнения технических изделий определяются ГОСТ 15150–69 и имеют определенный диапазон рабочих температур [8]. Так, для изделий, предназначенных для эксплуатации в холодном климате (исполнение ХЛ), диапазон темпера-

туры воздуха при эксплуатации составляет от  $-60$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако чаще всего ЭКБ, применяемая в РЭА различного назначения, работоспособна в диапазоне температур от  $-40$  до  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, необходимо обеспечивать работоспособность РЭА при более низкой температуре, чем позволяет диапазон рабочих температур ЭКБ. Обычно это достигается путем нагрева ЭКБ до рабочей температуры на печатных платах (ПП), контактным или радиационным нагревом узлов РЭА. Для этого используют различные нагревательные элементы, такие как резистивный элемент в слоях ПП, нагревательные резисторы поверхностного монтажа, гибкие силиконовые нагреватели, нагревательные пластины и высокотемпературные нагреватели. Классификация нагревателей ЭКБ РЭА схематично представлена на рис. 1.

Целью работы является обзор устройств подогрева ЭКБ РЭА в условиях воздействия отрицательных температур.

### Резистивный элемент в слоях печатной платы

Один из наиболее эффективных способов нагрева элементов на ПП основан на пропускании электрического тока через плоский проводник, свернутый в меандр, расположенный на внутреннем слое и распределенный по всей площади ПП [9, 10].

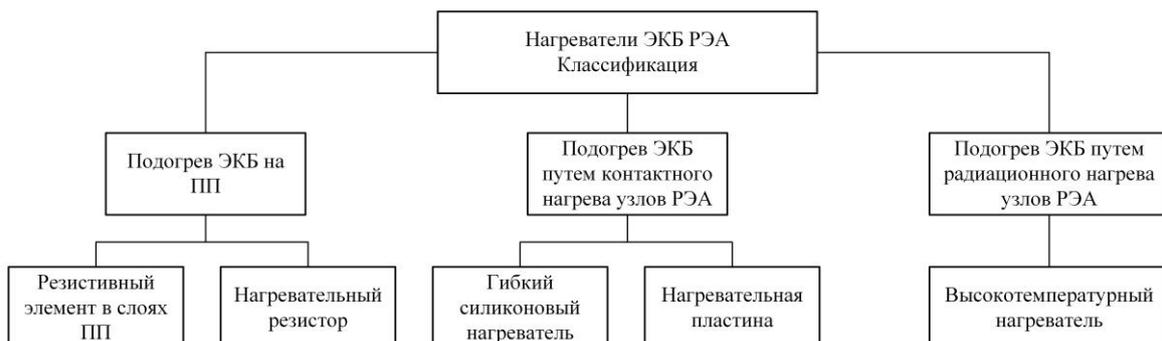


Рис. 1. Классификация нагревателей ЭКБ РЭА

В таком случае для нагрева используются только материалы, из которых изготовлена ПП, и не требуются дополнительные элементы.

Для надежной работы необходимо, чтобы нагрев проводников под действием тока не приводил к физико-химическим изменениям в окружающем их диэлектрике [11]. Резистивный элемент благодаря своей плоской форме хорошо отдает тепло и допускает большие плотности тока без каких-либо для них последствий.

При подаче тока на резистивный элемент в начальный момент времени тепловое сопротивление теплоотвода определяется сопротивлением теплопередачи от нагревающегося проводника в область диэлектрика, находящуюся в непосредственной близости от его поверхности. В этот момент нагревается преимущественно тело проводника. С течением времени нагреваются все большие и большие массы вокруг материала проводника, границы теплоотвода отодвигаются, следовательно, меняются значения теплоемкости и теплового сопротивления [12].

Идеальный резистивный элемент должен иметь компактный рисунок для уменьшения объема и снижения потребляемой мощности. Однако плотные изогнутые рисунки резистивного элемента приводят к неоднородному распределению плотности тока. На участках наибольшей кривизны, где обычно ток идет по наискратчайшему пути, по наименьшему радиусу, происходит неоднородное распределение плотности тока [13]. Это называется явлением «сжатия тока» и может привести к локальному перегреву и формированию тепловых горячих точек. Повышение температуры может также приводить к локальному тепловому расширению материалов. В результате возникает большое напряжение в стыкуемых частях и появляются некоторые трещины или разъединение соединений, что приводит к деструктивным изменениям или коротким замыканиям в ПП. Это может существенно сократить срок службы или даже вызвать отказ РЭА [14]. Скругление углов резистивного элемента уменьшает эти неравномерности, но лишь частично.

Нагрев ПП выше температуры стеклования ( $T_g$ ) опасен тем, что при таком нагревании коэффициент теплового расширения (КТР) диэлектрика, например FR-4, по оси  $Z$  резко меняется с 45–55 до 200–250 мкм/м°C, в то время как КТР меди остается прежним – около 15 мкм/м°C [15]. В этом случае сколь угодно длительное воздействие температур, превышающих  $T_g$ , неминуемо приводит к разрыву стенок металлизированных отверстий ПП [16]. Для FR-4  $T_g$  равна 130 °C. Перегрев может приводить к отслаиванию тонких проводников, а также к деформации ПП. Поэтому максимальная температура резистивного элемента и темп его нагрева ограничены плотностями тока, который можно пропустить через него, а также  $T_g$  материала диэлектрика ПП. Также необходимо обеспечить равномерность распределения температурного поля по поверхности. Удельная теплопроводность стеклотекстолита низкая и равна

0,3–0,45 Вт/м·К. Если нагревательный элемент находится, например, на нижнем слое, то подогрев осуществляется только с нижней стороны. Поэтому нижние слои текстолита ПП будут прогреваться быстрее, чем верхние. Тепловое линейное расширение нижних слоев больше, чем верхних, – это приводит к прогибу платы вниз. Эффект усугубляется с ростом толщины платы. Борьба с тепловыми деформациями следует путем снижения скорости нагрева ПП до приемлемой величины. Дополнительные проблемы возникают при подогреве ПП большой площади. Если такая ПП закреплена за края, то в процессе сильного подогрева ее центр будет прогибаться [17]. Следует обеспечить медленный равномерный нагрев, не перегревая ПП, либо в местах предполагаемого прогиба устанавливать дополнительные точки опоры.

В [18] представлена ПП с медным резистивным элементом. Схема резистивного элемента показана на рис. 2.

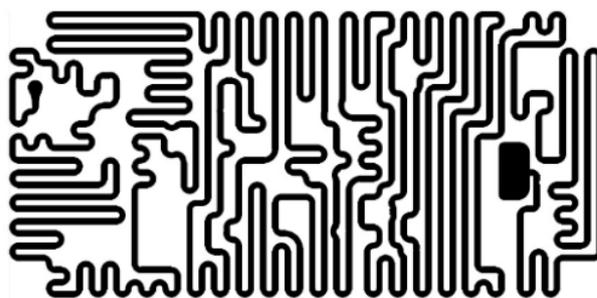


Рис. 2. Резистивный элемент, расположенный во внутреннем слое ПП

Резистивный элемент расположен на втором слое шестислойной ПП. Резистивный элемент огибает сквозные переходные отверстия ПП, тем самым имеет сложную геометрическую форму. Он проектировался по принципу максимального заполнения площади ПП под микросхемами или в их близости. Сопротивление резистивного элемента равно 0,875 Ом. В ходе экспериментальных исследований ПП предварительно охлаждалась в морозильной камере до температуры –55 °C. После этого на резистивный элемент подавалось напряжение 5 В, потребляемый ток был равен 5,71 А, а мощность 28,57 Вт. Таким образом, датчик температуры, расположенный на ПП, прогревался с –55 до –35 °C за 17 с.

Необходимо отметить, что для качественного нагрева ЭКБ на ПП до рабочей температуры необходима равномерность распределения температурного поля, на которую влияют расположение, размеры, количество, плотность размещения электронных компонентов. Если несколько массивных компонентов расположены рядом, то этот участок платы будет нагреваться медленнее, чем области с мелкими компонентами. Поэтому необходимо уменьшить скорость нагрева. Если на микросхемах установлены металлические радиаторы, то нужно учесть, что такой компонент будет потреблять большое количество тепла и долго нагреваться.

Также важным параметром является скорость нагрева, оптимальной можно считать 0,3–0,5 °С/с для сложных многослойных ПП и до 1 °С/с для простых плат. При таком режиме нагрева, меньше вероятность нанести деструктивные изменения ПП под действием высокой температуры. Кроме этого, важным условием являются внешние факторы, например, такие как наличие обдува воздухом которое отразится на скорости и равномерности нагрева [19].

#### Нагревательные резисторы

Для подогрева ЭКБ на ПП часто используют различные нагревательные резисторы. Одним из таких элементов является низкоомный резистор поверхностного монтажа, в корпусе DPAK серии DTO25 фирмы VISHAY [20], который показан на рис. 3.



Рис. 3. Резистор поверхностного монтажа в корпусе DPAK

Номинальная мощность такого резистора составляет 25 Вт. Он имеет металлизированный вывод увеличенных размеров для отвода тепла и подключается к контактной площадке на ПП, которая, в свою очередь, с помощью переходных металлизированных отверстий соединена с одним из внутренних слоев многослойной ПП [21, 22]. При этом медный слой, к которому подключен такой резистор, занимает всю площадь ПП или ту площадь, в области которой расположена ЭКБ, нуждающаяся в подогреве. Таким образом, пропуская через себя ток, резистор выделяет тепло, которое распределяется по медному слою, а тот в свою очередь, отдает тепло сначала в объем всей платы, а далее и к ЭКБ. Аналогичным устройством являются керамические нагревательные резисторы КРН-150 [23], которые показаны на рис. 4. Они работают по такому же принципу, но имеют большую надежность за счет того, что изготовлены из высокотемпературной прочной керамики, что позволяет повысить срок эксплуатации до 10 лет.

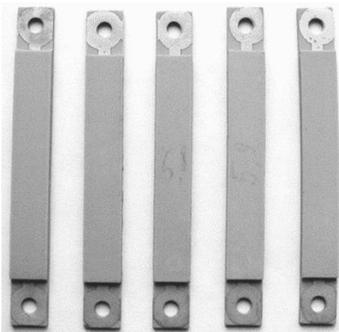


Рис. 4. Нагревательные керамические резисторы КРН-150

Недостатком такого решения является занимаемая площадь, что может быть недопустимо для малогабаритной РЭА.

#### Гибкий силиконовый нагреватель

Устройством для контактного подогрева узлов РЭА являются силиконовые нагреватели [24, 25], которые изготавливаются из термостойкого кремнийорганического полимера (силиконовой резины), усиленного в условиях промышленного производства слоем конструкционного стекловолокна. Силиконовый нагреватель показан на рис. 5.

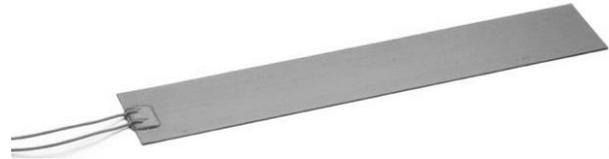


Рис. 5. Силиконовый нагреватель

В качестве термоэлемента силиконового нагревателя используется расположенная в рядном порядке высокорезистивная нихромовая проволока (X12H75M) или термофольга (X20H80M) с вытравленным рисунком теплового контура. Варианты теплового контура показаны на рис. 6.

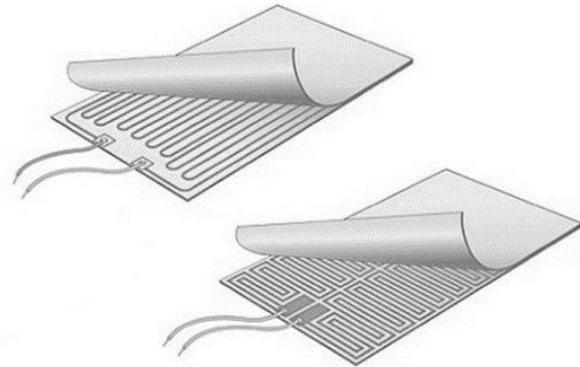


Рис. 6. Варианты теплового контура силиконового нагревателя

Особенность силиконовых нагревателей в их гибкости и устойчивости к воздействию жидкости и некоторых реагентов. Они обладают высокой атмосферной и бактерицидной стойкостью, могут эксплуатироваться практически в любых погодных условиях, обладают стойкостью к соляной (до 10%) и серной (до 20%) кислотам, стойкостью к озону, водяному пару (до 180 °С) и многим органическим и неорганическим химическим реагентам. Многие нагревательные элементы имеют контактный способ нагрева, но есть случаи, когда невозможно создать абсолютно идеальную ровную поверхность. В таких случаях целесообразно применять силиконовые нагреватели благодаря их высоким эластичным свойствам. Кроме того, они имеют различные варианты крепления, такие как самоклеящаяся пленка, наклеивание с помощью силиконового вулканизатора, запрессовка посредством прижимных пластин, крепление с помощью пружин растяжки. Рабочая температура силиконовых нагревателей при длительном ис-

пользовании не должна превышать 200 °С. Допускается кратковременный нагрев до 260 °С, но при достижении максимальной температуры в 300 °С происходят необратимые разрушения нагревателя.

### Нагревательные пластины

Следующим эффективным устройством нагрева являются нагревательные пластины, которые могут быть выполнены на различных подложках из нержавеющей стали [26], стекла [27], алюминия [28] или керамики [29]. Такие устройства изготавливаются по толстопленочной технологии. Нагревательная пластина на подложке из нержавеющей стали показана на рис. 7.



Рис. 7. Нагревательная пластина на подложке из нержавеющей стали

Нагревательные пластины предназначены для контактного нагрева плоских поверхностей. По сравнению с силиконовыми нагревателями нагревательные пластины обеспечивают существенно лучшую передачу температуры и более высокую мощность при компактных размерах. Эти элементы также могут быть полезны в приложениях, где важна малая толщина нагревательного элемента.

В патенте [30] нагревательная пластина использует алюминиевую подложку вследствие ее исключительно высокой теплопроводности и возможности однородного нагрева. Нагревательная пластина на алюминиевой подложке показана на рис. 8.

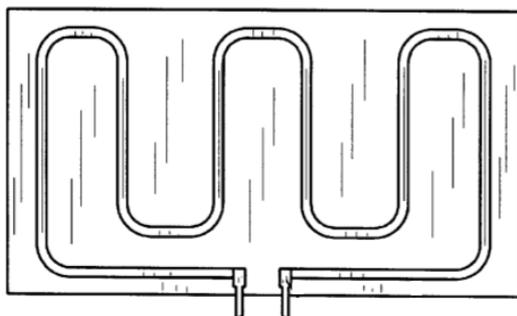


Рис. 8. Нагревательная пластина на алюминиевой подложке

Поскольку подложка имеет очень высокий КТР, то поверх подложки накладывается изолирующий слой. Однако важно отметить, что предлагаемые дополнительные слои приводят к большой теплоемко-

сти вследствие увеличения массы и объема, что нежелательно в связи с потребляемой мощностью и требуемым временем для достижения желаемых температур. Увеличенная масса и объем также делают нагревательную пластину непригодной для некоторых применений с малым объемом.

В [31] показан планарный нагревательный элемент с резисторной структурой с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Он представляет собой планарный нагревательный элемент, расположенный на заданной площади подложки. Планарный нагревательный элемент показан на рис. 9.

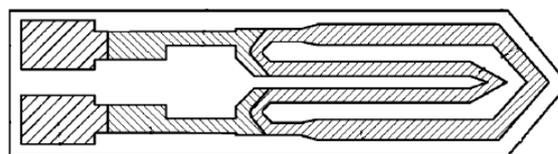


Рис. 9. Планарный нагревательный элемент с резисторной структурой с положительным ТКС

Его резистивный элемент, исходя от обоих соединительных электроконтактов, имеет внутреннюю токопроводящую дорожку и параллельно подключенную внешнюю токопроводящую дорожку. При этом сопротивление внутренней токопроводящей дорожки больше сопротивления внешней токопроводящей дорожки. Это сделано для того, чтобы при подведении напряжения обеспечить равномерное распределение температуры в границах заданной площади.

К преимуществам нагревательных пластин можно отнести равномерность теплоотдачи по всей рабочей поверхности, высокий уровень термостойкости, малую толщину, возможность изготовления в разных формах, длительный срок службы. Наличие крепежных отверстий, с одной стороны, является положительным фактором в удобстве эксплуатации и непосредственной установке. Но, с другой стороны, эти отверстия уменьшают рабочую зону и эффективный теплообмен.

К недостаткам можно отнести вероятность нарушения плотности контакта между нагревателем и объектом нагрева. Если она нарушается, то эффективность теплового воздействия значительно снизится и нагреватель может вскоре перегреться и выйти из строя. Для снижения вероятности появления такого явления необходимо соблюдать правила монтажа и эксплуатации и при необходимости использовать термопасту.

### Высокотемпературные нагреватели

Высокотемпературный нагреватель [32] предназначен для нагрева конструкций летального аппарата (ЛА), однако это устройство можно использовать и для нагрева узлов РЭА из состава ЛА. Высокотемпературный нагреватель обеспечивает радиационный нагрев с помощью пластинчатого тепловыделяющего токопроводника в форме меандра. Меандр выполнен со скругленными углами и имеет дополнительные продольные прорезы, образующие несколько параллельных токопроводников. Это необходимо для того,

чтобы устранить локальный перегрев и появление больших температурных напряжений по сечению. Локальный перегрев вызывается тем, что ток идет по наикратчайшему пути, по наименьшему радиусу образуя большие плотности тока. Высокотемпературный нагреватель показан на рис. 10.

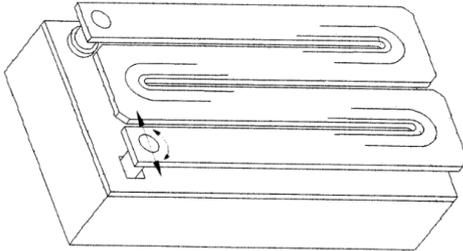


Рис. 10. Высокотемпературный нагреватель

Продольные прорезы расположены на участках наибольшей кривизны меандра. Количество, длины и площади поперечных сечений параллельных токопроводников определяются экспериментально. Это позволяет сократить неравномерность температуры по сечению с 300 до 100 °С и довести плотность тока до 100 А/мм<sup>2</sup>. Максимальная температура нагревателя и темп его нагрева ограничены плотностями тока, который можно пропустить через него, а также температурой 3000 °С.

Также к категории высокотемпературных относится графитовый нагреватель [33], который показан на рис. 11 и представляет собой нагревательный элемент из графитового материала, непосредственно подключаемого к электросети. От особенностей его устройства зависят температурные показатели, параметры теплового поля в зоне нагрева и массогабаритные характеристики. Изготавливают графитовые нагреватели из углеродных конструкционных или из углерод-углеродных композиционных материалов.

Значение потребляемого тока может составлять от единиц ампер до сотен килоампер. Высокая термостойкость, устойчивость к выгоранию обеспечивают высокий ресурс работы графитовых нагревателей. Они способны развивать предельно высокие темпе-

ратуры вплоть до 3000–4000 °С. При этом они сохраняют продолжительное время стабильность технических характеристик. К преимуществам можно отнести низкий КТР, устойчивость к температурным перепадам (тепловому удару), сохранение механической прочности при высокой температуре. Графитовые нагреватели считаются надежными и долговечными, характеризуются низким удельным весом, примерно на порядок меньшим, чем у металлических нагревателей.

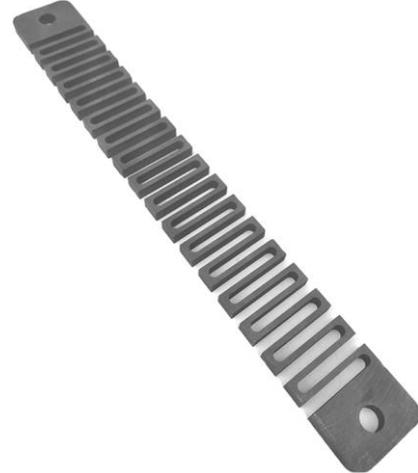


Рис. 11. Высокотемпературный графитовый нагреватель

#### Сравнительный анализ нагревательных элементов

Использование нагревательных элементов позволяет обеспечить работоспособность РЭА в условиях воздействия отрицательных температур ниже, чем рабочая температура современной ЭКБ. В зависимости от специфики применения и конструкции РЭА возможно использование различных нагревательных элементов, каждое из которых обладает своими параметрами. Этими параметрами являются максимальная температура нагревательного элемента, способ нагрева и стоимость. Для сравнительного анализа, параметры нагревательных элементов сведены в таблицу.

Сравнение нагревательных элементов

Параметр/тип нагревательного элемента	Резистивный элемент в слоях ПП	Нагревательный резистор	Гибкий силиконовый нагреватель	Нагревательная пластина	Высокотемпературный нагреватель
Способ подогрева	Нагрев резистивного элемента во внутренних слоях ПП	Подключение к внутренним слоям ПП и их нагрев	Контактный подогрев узлов РЭА	Контактный подогрев узлов РЭА	Радиационный подогрев узлов РЭА
Максимальная температура нагревательного элемента, °С	130*	130*	260	500	3000
Стоимость, Р	До 1000	До 1000**	До 10000**	До 3000**	До 7000**

\* При использовании FR-4 в качестве материала диэлектрика ПП.

\*\* В зависимости от материалов, формы и мощности нагревателя.

Из таблицы видно, что рассмотренные нагревательные элементы обладают различными способами подогрева, максимальной температурой и стоимо-

стью. При выборе нагревательного элемента необходимо ориентироваться на конкретные особенности РЭА.

Резистивный элемент в слоях ПП обеспечивает нагрев за счет выделения тепла сначала в область диэлектрика, а затем и к ЭКБ, установленной на ПП, что позволяет обеспечить быстрый нагрев. Так как резистивный элемент расположен во внутренних слоях, такое решение имеет минимальные габариты. За счет того, что этот нагревательный элемент представляет собой плоский проводник во внутреннем слое ПП, то имеет минимальную стоимость и габариты. Однако по сравнению с остальными нагревательными элементами он обладает низкой максимальной температурой, которая определяется  $T_g$  материала диэлектрика ПП. Для FR-4 это значение равно 130 °С. Поэтому очень важно следить за потребляемой мощностью и температурой ПП. Иначе циклический, неконтролируемый и неравномерный нагрев ПП может приводить к короблению ПП, необратимым деструктивным изменениям в диэлектрике, а также трещинам и разрыву переходных отверстий.

Другим устройством для подогрева ЭКБ РЭА является нагревательный резистор. Этот нагревательный элемент имеет малую стоимость среди рассмотренных вариантов. При его установке на ПП он подключается к внутреннему медному слою с помощью металлизированных переходных отверстий. За счет того, что медный слой распределен по всей площади ПП, нагрев происходит более равномерно, чем в предыдущем варианте. Однако такой способ подогрева ЭКБ РЭА имеет тот же недостаток в виде максимальной температуры нагревательного элемента, равной  $T_g$  материала диэлектрика ПП.

В случаях когда требуется контактный подогрев узлов РЭА и они имеют сложную форму, целесообразно применять гибкие силиконовые нагреватели. По сравнению с предыдущими устройствами максимальная температура такого нагревательного элемента выше, определяется материалом, из которого он изготовлен, и равна 260 °С. К тому же из-за гибкости такого нагревательного элемента он может принимать любую форму и иметь различные виды крепления. К недостаткам можно отнести высокую стоимость, а также расход части тепла на обогрев окружающего пространства.

В условиях, когда необходим контактный подогрев узлов РЭА через плоскость, используют нагревательные пластины. Они имеют значительно меньшую стоимость, чем гибкие силиконовые нагреватели, и более высокую максимальную температуру нагрева, которая может достигать до 500 °С. Это позволяет обеспечить более быстрый подогрев узлов РЭА. Однако нагревательные пластины также расходуют часть тепла в окружающее пространство. Кроме того, при нарушении плотности контакта нарушается эффективность теплового воздействия, что может привести к выходу нагревательной пластины из строя.

Высокотемпературный нагреватель не имеет непосредственного контакта с узлами РЭА и используется в случае, когда необходим их радиационный нагрев. Его максимальная температура может дохо-

дить до 3000 °С, что значительно выше, чем у остальных рассматриваемых нагревательных элементов. Стоимость высокотемпературного нагревателя немного ниже, чем гибкого силиконового нагревателя, но выше остальных нагревательных элементов. Однако необходимо отметить, что такое устройство нецелесообразно применять в РЭА с высокой плотностью компоновки и монтажа.

### Заключение

Таким образом, выполнен обзор устройств подогрева ЭКБ РЭА в условиях воздействия отрицательных температур. Представлены различные нагревательные элементы, кратко описан принцип их работы и определены условия применения. Проведен сравнительный анализ нагревательных элементов и выявлены их достоинства и недостатки. Если необходим нагрев ЭКБ на ПП, то целесообразно применять подогрев с помощью резистивного элемента во внутренних слоях или нагревательного резистора. Такие решения имеют малые габариты и низкую стоимость, однако их максимальная температура ограничивается  $T_g$  материала диэлектрика ПП. В условиях, когда необходим контактный нагрев узлов РЭА, стоит использовать гибкие силиконовые нагреватели или нагревательные пластины. Максимальная температура таких нагревателей значительно выше. Кроме того, гибкие силиконовые нагреватели позволяют обеспечивать подогрев узлов РЭА сложной формы.

Однако такие нагреватели имеют высокую стоимость. А в случае нагревательных пластин, при нарушении плотности контакта, нагревательный элемент может выйти из строя. Поэтому необходимо соблюдать правила монтажа, эксплуатации, а также применять дополнительные средства для улучшения плотности контакта, например термопасту. В случае когда необходим радиационный подогрев узлов РЭА, стоит использовать высокотемпературные нагреватели. Они имеют наибольшую максимальную температуру, устойчивы к температурным перепадам и сохраняют механическую прочность при высокой температуре. Но при этом высокотемпературные нагреватели нецелесообразно применять в РЭА с высокой плотностью монтажа.

Данный обзор может быть полезен при проектировании критичной РЭА, используемой в условиях воздействия отрицательных температур, и помочь в обеспечении тепловых режимов РЭА.

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

### Литература

1. Горбунов В.П. Проблемы эксплуатации современных самолетов в условиях низких и сверхнизких температур Сибири, Севера и Арктики // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 204. – С. 110–114.
2. High Strain-Rate Properties for SAC305 at Cold Operating Temperatures down to –65 C / P. Lall, V. Mehta, J. Suhling, K. Blecker // 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). – Orlando, FL, USA, 2020. – P. 1073–1083.

3. Extreme Cold-Temperature High-Strain Rate Properties of SAC Solder Alloys / P. Lall, V. Yadav, V. Mehta, J. Suhling, K. Blecker // IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). – Orlando, FL, USA, 2020. – P. 782–792.
4. Горбунов В.П. Метод поддержания летной годности воздушных судов с бортовым цифровым комплексом в условиях экстремально низких температур: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2017. – 176 с.
5. Research Progress of Extreme Low Temperature Reliability of Typical Electronic Interconnection Structures / Z. Sun, X. Guo, Z. Zhao, Y. Ni, G. He // 22-nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). – Xiamen, China, 2021. – P. 1–5.
6. Белоус А.И. Космическая электроника. – М.: Техносфера, 2015. – 696 с.
7. ГОСТ Р 56649–2015. Техника ракетно-космическая. Электронная компонентная база иностранного производства. Порядок применения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 60 с.
8. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Стандартинформ, 2010. – 71 с.
9. Пат. 166556 РФ, МПК H05K 3/46. Многослойная печатная плата с возможностью подогрева элементов радиоэлектронной аппаратуры в условиях воздействия экстремально отрицательных температур / А.В. Прыщак, А.Н. Егоров, В.Э. Иванов, А.В. Селифанов, С.В. Захарова, А.И. Дьянов (РФ). – № 2015149399; заявл. 17.11.15; опубл. 10.12.16.
10. Сокольский А.М. Методы и средства борьбы с электрохимической миграцией в устройствах авионики: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2017. – 124 с.
11. Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.
12. Brooks D., Adam J. PCB Design Guide to Via and Trace Currents and Temperatures. – Norwood: Artech house Publ., 2021. – 271 p.
13. Pattnayak R.A. Thermal and Electro-Thermal Analysis of DC-DC convertor for 3 wheeler electric vehicle / R.A. Pattnayak, B.M. Baskar // 2020 IEEE 8th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC). – Tønsberg, Norway, 2020. – P. 1–5.
14. Сальников М.Ю. Организация разработки современных тепловых методов диагностики и контроля электронных устройств / М.Ю. Сальников, Н.М. Блажевич // Матер. 22-й Всерос. молодежной научной школы-семинара «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники». – Ульяновск, Россия, 2019. – С. 60–62.
15. Пахнин А. Современные высокотемпературные материалы для производства высоконадежных многослойных печатных плат / А. Пахнин, П. Казаков // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. – 2011. – № 4. – С. 24–27.
16. Сергеев В.Я. Тепловая модель сквозного металлизированного отверстия печатной платы при одностороннем нагреве / В.Я. Сергеев, А.М. Ходаков, М.Ю. Сальников // Изв. высших учебных заведений. Электроника. – 2021. – Т. 26, № 5. – С. 426–431.
17. Tsenev V. Approach to reduce PCB distortion after heat treatment for soldering with reflow process / V. Tsenev, V. Videkov // 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET). – Sozopol, Bulgaria, 2020. – P. 1–4.
18. Храмов М.В. Оценка возможности использования печатной платы с резистивным элементом для подогрева микросхем промышленного назначения // Матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2021». – Томск, 2021. – Т. 1. – С. 214–217.
19. Технология правильного подогрева печатных плат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://termopro.ru/files/1512/Tehnologiya\\_podogreva.pdf](http://termopro.ru/files/1512/Tehnologiya_podogreva.pdf), свободный (дата обращения: 13.03.2022).
20. Vishay DTO 25 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vishay.com/docs/51054/dto25.pdf>, свободный (дата обращения: 13.03.2022).
21. Zhang Y. Improved Numerical-Analytical Thermal Modeling Method of the PCB With Considering Radiation Heat Transfer and Calculation of Components Temperature // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 92925–92940.
22. Thermal Modeling and Design Optimization of PCB Vias and Pads / Y. Shen, H. Wang, F. Blaabjerg, H. Zhao, T. Long // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – Vol. 35. – P. 882–900.
23. Керамический нагреватель KPH-150 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.edelbox.ru/product/bs150>, свободный (дата обращения: 13.03.2022).
24. Бюллер А.В. Разработка и исследование гибкого резистивного нагревателя на стеклотканевой основе / А.В. Бюллер, Е.А. Старостина // Сборник тезисов докладов XLV Междунар. молодежной науч. конф. «Гагаринские чтения». – М., 2019. – С. 835–836.
25. Обзор и анализ гибких нагревательных элементов для обогрева рабочих органов машин / В.А. Егоров, А.М. Воронович, И.А. Буглак, Д.Е. Иванов // Механика XXI века. – 2019. – № 18. – С. 228–234.
26. Thick-film heating element HTS-14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.telpod.pl/\\_files/ugd/b5b7b4\\_117d64ec33e04ca8a766015be52fcc09.pdf](https://www.telpod.pl/_files/ugd/b5b7b4_117d64ec33e04ca8a766015be52fcc09.pdf), свободный (дата обращения: 13.03.2022).
27. Transparent Oxide/Metal/Oxide Thin Film Heater With Integrated Resistive Temperature Sensors / N. Lovetchio, V. Di Meo, D. Caputo, A. Nascetti, A. Crescitelli, E. Esposito, G. de Cesare // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21. – P. 18847–18854.
28. Тепловые и электрические характеристики плоских нагревателей из алюминия с нанопористым анодным оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити / И.А. Врублевский, К.В. Чернякова, Д.В. Горбачев, Е.Н. Муратова, В.А. Мошников // Матер. 28-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, Россия, 2018. – С. 1013–1016.
29. Thick-film heating element GBR-601 Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.telpod.pl/\\_files/ugd/b5b7b4\\_a1c5c0b8d6a643cabe8b11946a04cabe.pdf](https://www.telpod.pl/_files/ugd/b5b7b4_a1c5c0b8d6a643cabe8b11946a04cabe.pdf), свободный (дата обращения: 13.03.2022).
30. Пат. 6222166 США, H05B 3/02. Aluminum substrate thick film heater / H. Lin, T. Laskowski (US). – 2006.
31. Пат. 2668087 РФ, МПК H05B 3/20. Планарный нагревательный элемент с резисторной структурой с положительным ТКС / Х. Джири, Л. Мирко, Ф. Йозеф (СН). – № 2017100894; заявл. 12.06.15; опубл. 26.09.18. – Бюл. № 27.
32. Пат. 2483492 РФ, МПК H05B 3/00. Высокотемпературный нагреватель / А.В. Бобров, И.И. Лопухов, И.В. Петрова, А.Б. Филимонов, Ю.Ю. Ширинов (РФ). – № 2011153046; заявл. 27.12.2011; опубл. 27.05.13. – Бюл. № 15.
33. Нагреватель графитовый высокотемпературный [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doncarb.com/articles/nagrevatel-grafitovyyu>, свободный (дата обращения: 13.03.2022).

**Храмов Максим Владимирович**

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)  
Томского государственного ун-та  
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-7901-0911  
Тел.: +7-923-311-68-69  
Эл. почта: khramtsovmaxim@yandex.ru

**Заболоцкий Александр Михайлович**

Зав каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) ТУСУР  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-1801-7922  
Тел.: +7 (382-2) 41-36-43  
Эл. почта: amz@tusur.ru

Khramtsov M.V., Zabolotsky A.M.

**Devices for heating the electronic component base of radio-electronic equipment in conditions of negative temperatures**

It is known that the modern electronic component base (ECB), used in radio electronic equipment (REE) for various purposes, is operable only in a certain temperature range. At the same time, during the development of REE, the requirements are often made for guaranteed operation in more severe climatic conditions, including when exposed to negative temperatures. In this regard, it is necessary to ensure the given thermal regimes of REE. To do this, various heating devices are used, each of them makes it possible to ensure the operation of the electronic equipment under conditions of exposure to negative temperatures, by heating the ECB to the operating temperature. The paper provides a review, a comparative analysis, and gives recommendations on the use of modern ECB heating devices for REE under conditions of exposure to negative temperatures. This material can be used in the design of REE and help to ensure its thermal conditions.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-3-28-36

*References*

1. Gorbunov V.P. *Problemi ekspluatatsii sovremennih samoletov v usloviyah nizkikh i sverhnizkikh temperature Sibiri, Severa b Arktiki* [Problems of operation of modern aircraft in conditions of low and ultra-low temperatures in Siberia, the North and the Arctic]. *Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2014, no. 204, pp. 110–114 (in Russ.).
2. Lall P., Mehta V., Suhling J., Blecker K. High Strain-Rate Properties for SAC305 at Cold Operating Temperatures down to –65°C. *2020 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, Orlando, FL, USA, 2020, pp. 1073–1083.
3. Lall P., Yadav V., Mehta V., Suhling J., Blecker K. Extreme cold-temperature high-strain rate properties of SAC solder alloys. *2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Orlando, FL, USA, 2020, pp. 782–792.
4. Gorbunov V.P. *Metod podderzhaniya letnoi godnosti vozdukhnykh sudov s bortovim cifrovim kompleksom v usloviyah ekstremalno nizkikh temperature* [Method for maintaining the airworthiness of aircraft with an on-board digital complex in conditions of extremely low temperatures]. Thesis. M., 2017, 176 p. (in Russ.).
5. Sun Z., Guo X., Zhao Z., Ni Y., He G. Research progress of extreme low temperature reliability of typical elec-

tronic interconnection structures. *2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Xiamen, China, 2021, pp. 1–5.

6. Belous A.I. *Kosmicheskaya elektronika* [Space electronics]. Moscow, Technosfera, 2015, 696 p. (in Russ.).

7. State standard 56649–2015 Rocket and space technology. Electronic component base of foreign production. Application procedure. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 60 p. (in Russ.).

8. State standard 15150–69 Machines, devices and other technical products. Versions for different climatic regions. Categories, conditions of operation, storage and transportation in terms of the impact of climatic factors of the environment. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 71 p. (in Russ.).

9. Prischak A.V., Egorov A.N., Ivanov V.E., Selifanov A.V., Zaharova S.V., Diyanov A.I. *Mnogosloynnaya pechatnaya plata s vozmozhnostiu podogreva elementov radioelektronnoy apparatury v usloviyah vozdeystviya ekstremalnih otricatelnykh temperature* [Multilayer printed circuit board with the possibility of heating elements of electronic equipment in conditions of exposure to extreme negative temperatures]. Patent RF, no. 166556, 2015.

10. Sokolsky A.M. *Metodi i sredstva borbi s elektrokhimicheskoy migratsiyey v ustroystvakh avioniki* [Methods and means of combating electrochemical migration in avionics devices]. Thesis. M., 2017. 124 p. (in Russ.).

11. Medvedev A.M. *Pechatnie plati. Konstrukcii I materialy* [Printed circuit boards. Structures and materials]. M., Technosfera, 2005. 304 p. (in Russ.).

12. Brooks D., Adam J. *PCB Design Guide to Via and Trace Currents and Temperatures*. Norwood, Artech house Publ., 2021, 271 p.

13. Pattnayak R.A., Baskar R.A. Thermal and Electro-Thermal Analysis of DC–DC convertor for 3 wheeler electric vehicle. *2020 IEEE 8th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)*. Tønsberg, Norway, 2020, pp. 1–5.

14. Salnikov M.U., Blazhevich N.M. *Organizatsiya razrabotki sovremennih teplovykh metodov diagnostiki i kontrolya elektronnykh ustroystv* [Organization of the development of modern thermal methods for diagnostics and control of electronic devices]. Aktualnye problemi fizicheskoy i funktsionalnoy elektroniki. Materialy 22-i vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy shkoly-seminara [Actual problems of physical and functional electronics. Proceedings of the 22nd all-Russian youth scientific school of the seminar]. Ulyanovsk, Russia, 2019, pp. 60–62 (in Russ.).

15. Pakhnin A., Kazakov P. *Sovremennye visokotemperaturnye materialy dlya proizvodstva visokonadezhnykh mnogosloynnykh pechatnykh plat* [Modern high-temperature materials for the production of highly reliable multilayer printed circuit boards] *Electronics Production: Technologies, Equipment, Materials*, 2011, no. 4, pp. 24–27.

16. Sergeev V.Y., Hodakov A.M., Salnikov M.U. *Teplovaya model skvoznogo metallizirovannogo otverstiya pechatnoi plati pri odnostoronnnem nagreve* [Thermal model of a through metallized hole of a printed circuit board with one-sided heating]. *News of Higher Educational Institutions. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 426–431.

17. Tsenev V., Videkov V. Approach to reduce PCB distortion after heat treatment for soldering with reflow process. *2020 – XXIX International Scientific Conference Electronics (ET)*. Sozopol, Bulgaria, 2020, pp. 1–4.

18. Khramtsov M.V. *Ocenka vozmozhnosti ispolzovaniya pechatnoy plati s rezistivnim elementom dlya podogreva mikrochem industrialnogo naznacheniya* [Evaluation of the

possibility of using a printed circuit board with a resistive element for heating industrial circuits]. *Materiali Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferencii studentov, aspirantov i molodih uchenih «Nauchnaya sessiya TUSUR–2021»* [Proceedings of the international scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists «TUSUR Scientific session – 2021»]. Tomsk, Russia, 2021, vol. 1, pp. 214–217 (in Russ.).

19. [Proper heating technology for printed circuit boards]. Available at: [http://termopro.ru/files/1512/Tehnolo-giya\\_podogreva.pdf](http://termopro.ru/files/1512/Tehnolo-giya_podogreva.pdf), free (Accessed: March 13, 2022) (in Russ.).

20. Vishay DTO 25. Available at: <https://www.vishay.com/docs/51054/dto25.pdf>, free (Accessed: March 13, 2022).

21. Zhang Y. Improved Numerical-Analytical Thermal Modeling Method of the PCB With Considering Radiation Heat Transfer and Calculation of Components Temperature. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 92925–92940.

22. Shen Y., Wang H., Blaaberger F., Zhao H., Long T. Thermal Modeling and Design Optimization of PCB Vias and Pads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, pp. 882–900.

23. [Ceramic heater KRN-150]. Available at: <http://www.edelbox.ru/product/bs150>, free (Accessed: March 13, 2022) (in Russ.).

24. Buller A.V., Starostina E.A. *Razrabotka i issledovanie gibkogo rezistivnogo nagrevatelya na steklotkanevoy osnove* [Development and research of a flexible resistance heater based on glass fabric]. *Gagarinskie chteniya. Sbornik tezisev dokladov XLV mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferencii [Gagarin's Readings. Collection of abstracts of the XLV International Youth Scientific Conference]*, Moscow, Russia, 2019, pp. 835–836. (in Russ.).

25. Egorov V.A., Voronovich A.M., Buglak I.A., Ivanov D.E. Obzor i analiz gibkikh nagrevatelnykh elementov dlya obogreva rabochnykh organov mashin [Review and analysis of flexible heating elements for heating the working parts of machines] *Mechanics of the 21st Century*, 2019, no. 18, pp. 228–234.

26. Thick-film heating element HTS-14 Available at: [https://www.tel-pod.pl/\\_files/ugd/b5b7b4\\_117d64ec33e04ca8a766015be52fcc09.pdf](https://www.tel-pod.pl/_files/ugd/b5b7b4_117d64ec33e04ca8a766015be52fcc09.pdf), free (Accessed: March 13, 2022).

27. Lovecchio N., Di Meo V., Caputo D., Nascetti A., Crescitelli A., Esposito E., Cesare G. Transparent Oxide / Metal / Oxide Thin Film Heater With Integrated Resistive Temperature Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, pp. 18847–18854.

28. Vrublevskiy I.A., Chernyakova K.V., Gorbachev D.V., Muratova E.N., Moshnikov V.A. *Teplovie i elektricheskie kharakteristiki ploskikh nagrevateley iz aluminiya s nanoporistim anodnim oksidom aluminiya i rezistivnim elementom iz uglerodnoi niti* [Thermal and electrical characteristics of aluminum flat heaters with nanoporous anodic alumina and carbon filament resistive element]. *SVCH-tehnika i telekommunikacionnie tehnologii. Materiali 28-i mezhdunarodnoy krimskoy konferencii [Microwave Engineering and Telecommunication Technologies. Proceedings of the 28th International Crimean Conference]*. Sevastopol, Russia, 2018, pp. 1013–1016 (in Russ.).

29. Thick-film heating element GBR-601 Series Available at: [https://www.tel-pod.pl/\\_files/ugd/b5b7b4\\_a1c5c0b8d6a643cabe8b11946a04ca6e.pdf](https://www.tel-pod.pl/_files/ugd/b5b7b4_a1c5c0b8d6a643cabe8b11946a04ca6e.pdf), free (Accessed: March 13, 2022).

30. Lin H., Laskowski T. [Aluminum substrate thick film heater]. Patent US, no. 6222166, 2006.

31. Dzheri H., Mirko L., Yoizef F. Planarniy nagrevatelnyy element s rezistornoy strukturoy s polozhitelnim TKS [Planar heating element with PTC resistor structure]. Patent RF, no. 2668087, 2015.

32. Bobrov A.V., Lopuhov I.I., Petrova I.V., Filimonov A.B., Shirshov U.U. *Visokotemperaturniy nagrevatel [High temperature heater]*. Patent RF, no. 2483492, 2011.

33. [High-temperature graphite heater] Available at: <https://doncarb.com/articles/nagrevatel-grafitovyy>, free (Accessed: March 13, 2022) (in Russ.).

---

#### Maxim V. Khrantsov

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-7901-0911  
Phone: +7-923-311-68-69  
Email: khrantsovmaxim@yandex.ru

#### Alexander M. Zabolotsky

Head, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-1801-7922  
Phone: +7 (382-2) 41-36-43  
Email: amz@tusur.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И ИНФОРМАТИКА**



УДК 004.89

**А.В. Куртукова, А.С. Романов, А.М. Федотова, А.А. Шелупанов**

## **Архитектура интеллектуальной системы для идентификации автора исходного кода**

Разработка решений, предназначенных для идентификации автора исходного кода, является актуальной для области защиты интеллектуальной собственности и авторского права. Особую важность такие решения представляют для анализа исходных кодов промышленных программных продуктов, как правило, разрабатываемых на базе узкоспециализированных научных исследований. В данной статье представлена архитектура интеллектуальной системы, предназначенной для идентификации автора исходного кода на основе глубокой гибридной нейронной сети. Описаны основные структурные элементы разрабатываемой системы и их интерфейсы, а также механизмы, необходимые для ее корректного и быстрого функционирования.

**Ключевые слова:** программная система, исходный код, машинное обучение, автор, глубокие нейронные сети.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-39-44

Актуальность проблемы идентификации автора исходного кода программы обусловлена активной цифровизацией всевозможных сфер жизни людей: социальной, финансовой, производственной, образовательной и многих других. Одним из главных аспектов цифровизации является применение современных инструментов, в том числе программного обеспечения (ПО). Подавляющее большинство таких инструментов ориентировано на промышленность, товароборот, предпринимательство, военное дело и другие сферы деятельности, использующие узкоспециализированное ПО. Отсюда возникает необходимость в создании решений, предназначенных для защиты авторских прав и интеллектуальной собственности, объектами которых могут являться исходные коды программных продуктов. Особую ценность такие решения представляют для деятельности, осуществляемой в промышленных масштабах – оборонной, авиационной, продовольственной, фармацевтической и т.д. Это подтверждается тем, что промышленные программные решения являются исключительной собственностью, так как разрабатываются на основе ряда узконаправленных исследований и с соблюдением строгих качественных требований.

Несмотря на большое количество трудов, посвященных проблеме определения автора естественно-языкового текста и их программным реализациям [1], подобные решения для искусственно-языковых текстов (в том числе исходных кодов), почти полностью отсутствуют. Поэтому возникает необходимость в разработке простой, эффективной и полнофункциональной интеллектуальной системы для идентификации автора исходного кода программы.

Главной сложностью при разработке интеллектуальной системы является выбор подхода к решению задачи определения авторства исходного кода программы. Существует множество потенциально эффективных подходов [2], основывающихся как на классических (дискриминантный, кластерный анализ, энтропийное сжатие и др.), так и на сложных моделях машинного обучения, в том числе на нейронных сетях (НС) [3–7]. Для создания ПО, га-

рантирующего высокую точность решения поставленной задачи, следует учесть опыт создания подобных решений и проблемы, с которыми сталкивались разработчики.

Единственным прямым аналогом разрабатываемого решения для идентификации автора исходного кода является ASAP [8]. Данное ПО функционирует на основе SCAP (авторские профили исходных кодов) и метода Борроуса [9]. Оба подхода реализуют идентификацию автора исходного кода путем сопоставления анонимного исходного кода с образцами, хранящимися в базе ASAP. Следует отметить, что в первом случае сравнение производится со сгруппированными по профилям образцами, во втором – без какой-либо группировки. Непосредственно ASAP представляет собой простое десктопное приложение. Данный инструмент имеет ряд недостатков. Эксперименты с применением методов, используемых в ASAP, проводились только для Java и C++ – инструмент не является универсальным для всех языков программирования. Кроме того, используемые методы являются эффективными исключительно при наличии в хранилище ASAP большого количества экземпляров исходных кода (более 3 тыс. для каждого автора). Также к недостаткам ПО относятся сложность его установки и тонкая ручная настройка.

Веб-сервис JPlag [10] является косвенным аналогом разрабатываемой системы и позволяет осуществлять проверку на плагиат, а также выявлять неоднородности исходных кодов, написанных на Java, C++, C и Scheme. Детальный отчет по найденным сходствам формируется в виде HTML-страниц с таблицами. Существенным недостатком сервиса является ограниченный функционал – он не может применяться для идентификации автора исходного кода.

Таким образом, была поставлена цель – спроектировать архитектуру интеллектуальной системы для идентификации автора исходного кода на основе НС.

### **Требования к интеллектуальной системе для идентификации автора исходного кода**

Интеллектуальная система должна анализировать исходные коды программ как сложные текстовые структуры с неотъемлемыми элементами, таки-

ми как комментарии и макросы, доли вклада каждого программиста и, в частности, разнородность данных, т.е. учитывать такие критические факторы, как

- количество языков. Существующие подходы и системы анализируют не более 4 языков программирования, что является их явным недостатком. Решение современных задач требует применения большего многообразия языков. Также привычки и стиль автора могут гибко переноситься с одного языка на другой в случаях, когда автор владеет двумя и более языками. Оптимальный подход, используемый в программной системе, должен это учитывать;

- опыт. С профессиональным ростом разработчик совершенствует свои навыки и процесс написания кода. Этот факт также важен, поэтому при анализе кода следует задействовать образцы из разных временных интервалов для одного и того же программиста;

- развитие команды. Обсуждение кода – стандартная практика коммерческой разработки, которая оказывает влияние на стиль написания кода внутри одной команды. Некоторые особенности кода меняются от одной команды к другой, а неявные и неконтролируемые программистом особенности – нет;

- творческая составляющая. У каждого разработчика есть свои предпочтения в использовании различных шаблонов и структур, поэтому написание программного кода является творческим процессом.

Важно учитывать, что исходный код не соответствует строгим правилам и изменяется в зависимости от личных предпочтений разработчика;

- продвинутое кейсы. В настоящее время коммиты, обфускация, стандарты кодирования, смешанные данные и сгенерированные исходные коды – важная часть процесса разработки ПО. Интеллектуальная система для анализа исходных кодов должна быть устойчива к сложным задачам. Создаваемая система должна соответствовать современным методам и инструментам разработки.

Система, учитывающая все обозначенные факторы, должна быть гибкой и полнофункциональной, т.е. исключая любые дополнительные действия со стороны пользователя, помимо выбора данных для дальнейшего анализа. Кроме того, система не должна требовать установки и настройки вспомогательных дистрибутивов, обеспечивающих функционирование отдельно взятых модулей.

### Архитектура интеллектуальной системы для идентификации автора исходного кода

При проектировании архитектуры программной системы необходимо учитывать ее наиболее важные структурные элементы, их интерфейсы, а также основные аспекты ее взаимодействия с пользователем и внешней средой. Модули архитектуры, представленной на рис. 1, можно сгруппировать по их функциональному назначению.

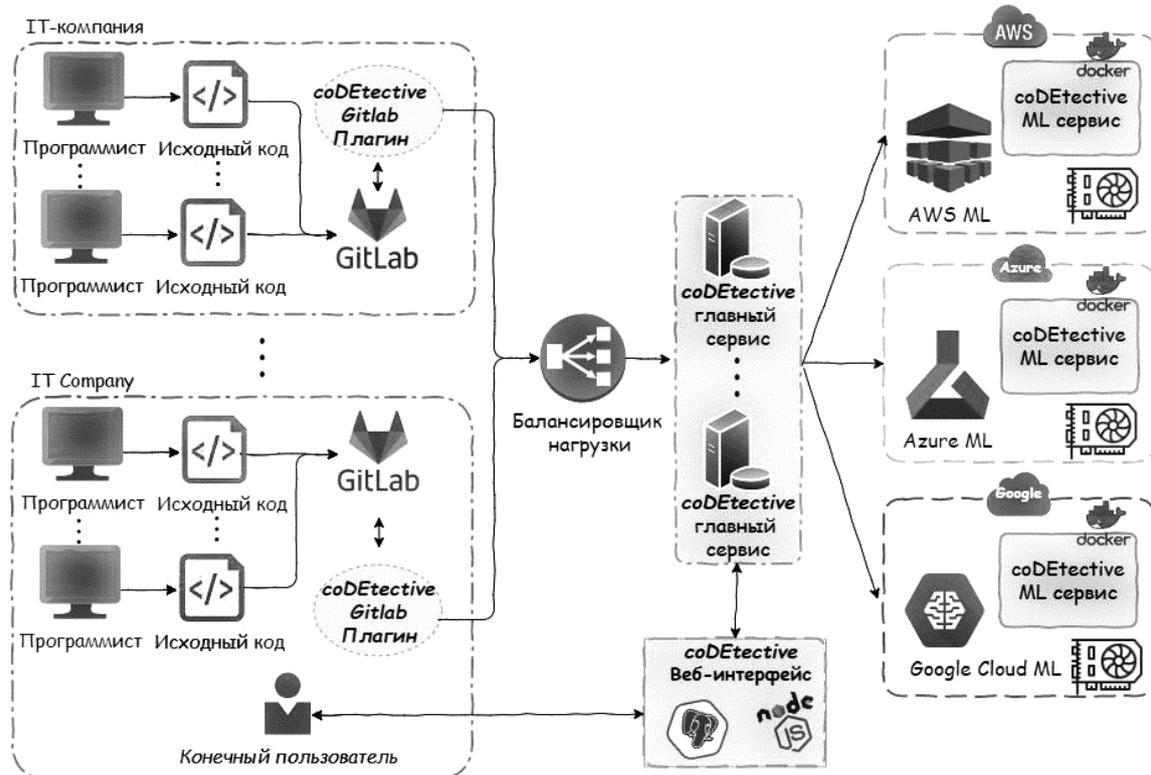


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной системы

Модули сбора, агрегации и преобразования исходных кодов используют специальный разработанный плагин для системы контроля версий GitLab [11], предустановленной внутри компании. Так,

осуществляется непрерывное получение последних версий исходных кодов и их последующего преобразования в векторный вид методом прямого кодирования (one-hot encoding).

Модуль взаимодействия с пользователем позволяет корректировать процесс работы интеллектуальной системы в зависимости от запросов и команд пользователя, передаваемых через веб-интерфейс. Кроме того, здесь же осуществляется процедура преобразования анонимного образца исходного кода, подлежащего идентификации, в векторный, аналогичный образцам с GitLab вид.

Главный сервис – модуль интеллектуальной системы, предназначенный для формирования из полученных векторизованных данных тренировочных и тестовых наборов, а также конфигурирования НС в соответствии с пользовательскими или базовыми настройками. Авторская архитектура НС, применяемая в системе, представлена на рис. 2.

Архитектура представляет собой гибрид из сверточных и рекуррентных сетей, что позволяет ей эффективно выявлять как временные зависимости, так и локальные информативные авторские признаки.

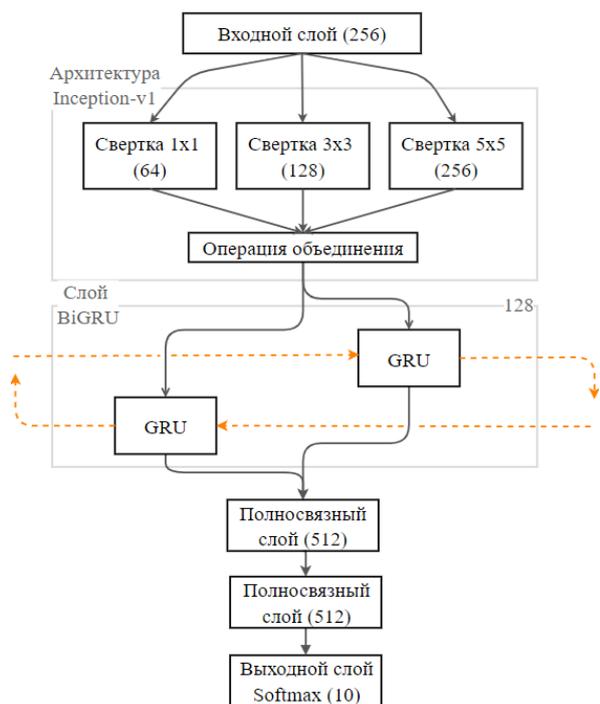


Рис. 2. Архитектура авторской НС

Архитектура состоит из следующих слоев:

1. Входной слой. Размерность входного слоя соответствует длине векторов, полученных от подсистемы анализа текстов.

2. Связка слоев Inception-v1. Данная связка включает в себя сверточные слои разных размерностей с фильтрами от 1 до 5. Вход каждой из сверток отличен по размеру от двух других. Таким образом, свертки образуют «бутылочное горлышко», через которое пропускают только самые информативные из исходных признаков. По завершению работы сверток их результаты объединяются в единый выход.

3. Двухнаправленные управляемые рекуррентные блоки (BiGRU). Полученный от сверточной части выход поступает на вход рекуррентной сети со

входной размерностью в 128. Текст анализируется в прямой и обратной последовательности.

4. Слои с прямой связью. Результат работы рекуррентной сети передается на вход двух последовательных слоев с прямой связью. Оба слоя имеют размерность в 512, за счет чего происходит масштабирование НС.

5. Выходной слой. В качестве выходного слоя используется Softmax. Данный слой позволяет получить распределение вероятности о принадлежности входного текста каждому из классов. Размерность слоя – 10, что применимо для 10 классов. Размерность напрямую зависит от количества классов предсказания для конкретной задачи.

Результатом работы этого модуля является передача конфигурации процесса обучения, архитектуры НС и наборов тренировочных данных на платформу некоторого крупного вендора облачных вычислений. Отличительной особенностью процесса обучения НС на платформе является его осуществление внутри docker-контейнера. Такое решение позволяет избежать необходимости в адаптации НС под фреймворк, используемый конкретным вендором. Центральная часть способна масштабироваться в зависимости от имеющихся ресурсов и требуемых объемов вычислений, обеспечивая оптимальную нагрузку.

#### Постановка эксперимента и результаты

С целью применения интеллектуальной системы для решения реальных практических задач необходимо было осуществить валидацию авторской НС. С ресурса GitHub был осуществлен сбор базы исходных кодов, содержащей свыше 250 тыс. образцов, написанных на 13 языках программирования. Данная база была сформирована с учетом критических факторов, встречающихся при решении реальных задач идентификации автора исходного кода программы.

В рамках эксперимента были сформированы корпуса образцов исходных кодов 5, 10 и 20 авторов-программистов. Для каждого автора производился отбор не более 20 образцов исходных кодов длиной не более 3000 символов.

Результаты экспериментов и общая информация о базе исходных кодов представлены в табл. 1. Оценка точности НС осуществлялась при помощи перекрестной проверки по 10 блокам. Для объективности заключения об эффективности авторской НС было решено осуществить дополнительные эксперименты. Данные эксперименты направлены на оценку точности авторской НС в сравнении с двумя наиболее популярными у исследователей методами идентификации автора исходного кода программы: BERT [12] и fastText [13]. Параметры обеих моделей были установлены в соответствии с рекомендациями [13]. Для оценки были взяты образцы авторов, программирующих на языке Java. Для каждого автора использовалось по 20 файлов для обучения. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 1  
Информация о данных и результаты экспериментов с различными корпусами

Язык	Общая информация о данных		Результаты экспериментов для корпусов из 5–20 авторов		
	Кол-во образцов	Кол-во авторов	5	10	20
C++	12366	72	0,92	0,92	0,90
Java	39708	73	0,97	0,93	0,89
JS	18375	69	0,92	0,82	0,76
Python	16783	57	0,95	0,92	0,92
C	17274	62	0,96	0,95	0,94
C#	19378	71	0,96	0,88	0,83
Ruby	19150	58	0,95	0,82	0,77
PHP	17158	80	0,92	0,89	0,86
Swift	12672	74	0,98	0,94	0,89
Go	14067	81	0,93	0,86	0,83
Groovy	14002	68	0,99	0,96	0,93
Kotlin	15274	72	0,91	0,85	0,81
Perl	11189	61	0,96	0,91	0,87

Таблица 2  
Результаты экспериментов с различными методами

Метод	Кол-во авторов		
	5	10	20
HNN	0,97	0,93	0,89
BERT	0,94	0,90	0,87
fastText	0,93	0,86	0,83

Для того чтобы убедиться в наличии статистически значимой разницы между HNN, BERT и fastText, использовались апостериорные тесты Фридмана и Неменьи. Тесты были применены к результатам кроссвалидации трех моделей. Нулевая гипотеза – разница между результатами моделей случайна. Альтернативная – разница между результатами моделей статистически значима. По результатам расчетов  $p$ -значение не превысило порог в 0,05, а нулевая гипотеза была отвергнута. Статистический тест подтвердил значимость разницы между результатами. Считается, что эффективность сравниваемых моделей значительно различается, если средние ранги моделей отличаются на величину критической разницы (CD) и более. Для того чтобы графически изобразить результат теста, была построена диаграмма значимости Демшара (рис. 3). Эта диаграмма демонстрирует различия в точности пар методов. Если разница между средними рангами пары методов меньше расчетной CD, то разница в их эффективности также незначительна и представляется горизонтальной линией на диаграмме.

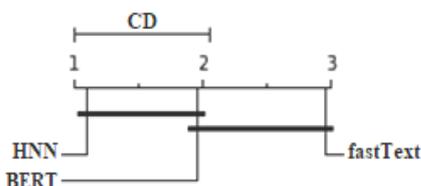


Рис. 3. Диаграмма значимости Демшара

Согласно диаграмме, HNN является наиболее точной. BERT демонстрирует незначительную раз-

ницу в эффективности по сравнению с HNN и с fastText. Однако fastText имеет низший ранг, поэтому BERT считается менее эффективным.

Полученные точности идентификации автора исходного кода позволяют сделать вывод о высокой эффективности применяемой НС и ее конкурентоспособности в сравнении с иными современными методами. HNN обеспечивает получение высокой точности для каждого из языков программирования в то время, как методы конкурентов адаптированы под 2–3 наиболее популярных языка. Также она учитывает изменения стиля программиста в результате улучшения его навыков и получения опыта командной разработки.

### Заключение

В рамках данной работы была спроектирована архитектура интеллектуальной системы для идентификации автора исходного кода на основе НС, представлены ее основные структурные элементы, их интерфейсы и механизмы для быстрого и эффективного функционирования.

Результаты экспериментов свидетельствуют о возможности применения системы для решения реальных задач идентификации автора исходного кода программы. Авторская НС продемонстрировала точность идентификации более 90% для 13 различных языков программирования, что является наилучшим результатом среди современных решений. Тесты Фридмана и Неменьи подтвердили статистическую значимость полученных результатов.

В дальнейшем планируется тестирование разработанной интеллектуальной системы в целом, а также оценка ее эффективности на практике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания ТУСУРа на 2020–2022 гг. (проект № FEWM-2020-0037).

### Литература

1. Романов А.С. Обобщенная методика идентификации автора неизвестного текста / А.С. Романов, А.А. Шелупанов, С.С. Бондарчук // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 1(21). – С. 108–112.
2. Куртукова А.В. Идентификация автора исходного кода методами машинного обучения / А.В. Куртукова, А.С. Романов // Труды СПИИРАН. – 2019. – № 18(3). – С. 741–765.
3. Caliskan-Islam A. Deanonimizing programmers via code stylometry / A. Caliskan-Islam, R. Harang, A. Liu // Proceedings of the 24th USENIX Security Symposium, Washington. – 2015. – P. 255–270. – URL: <https://www.usenix.org/system/files/conference/usenixsecurity15/sec15-paper-caliskan-islam.pdf>, свободный (дата обращения: 25.07.2022).
4. Caliskan-Islam A. Git Blame Who? Stylistic Authorship Attribution of Small, Incomplete Source Code Fragments / A. Caliskan-Islam, E. Dauber, R. Harang. – arXiv preprint. arXiv:1701.05681. 2019. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1701.05681.pdf>, свободный (дата обращения: 25.07.2022).
5. Alsulami B. Source Code Authorship Attribution using Long Short-Term Memory Based Networks / B. Alsulami, E. Dauber, R. Harang, S. Mancoridis, R. Greenstadt // Proceedings of the 22nd European Symposium on Research in

Computer Security, Oslo, Norway, September 11–15. – 2017. – P. 65–82. – URL: <https://www.cs.drexel.edu/~greenie/stylometry-esorics.pdf>, свободный (дата обращения: 25.07.2022).

6. Kurtukova A. Source Code Authorship Identification Using Deep Neural Networks / A. Kurtukova, A. Romanov, A. Shelupanov. – *Symmetry*. – 2020. – No. 12. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/12/2044/htm>, свободный (дата обращения: 25.07.2022).

7. Wang N. Integration of Static and Dynamic Code Stylometry Analysis for Programmer De-anonymization / N. Wang, S. Ji // *Proceedings of the 11<sup>th</sup> ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security*. – 2018. – P. 74–84. – URL: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3270101.3270110>, свободный (дата обращения: 25.07.2022).

8. Tennyson M.F. ASAP: A Source Code Authorship Program // *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*. – 2019. – Vol. 21. – P. 471–484.

9. Burrows S. Source code authorship attribution using *n*-grams / S. Burrows, S. Tahaghoghi // *Proceedings of the 12th Australasian Document Computing Symposium*, Melbourne, Australia, RMIT University. – 2007. – P. 32–39. – URL: [https://www.icsd.aegean.gr/publication\\_files/982250907.pdf](https://www.icsd.aegean.gr/publication_files/982250907.pdf), свободный (дата обращения: 25.07.2022).

10. JPlag [Электронный ресурс]. – URL: <https://jplag.ipd.kit.edu/>, свободный (дата обращения: 25.07.2022).

11. GitLab [Электронный ресурс]. – URL: <https://gitlab.com/>, свободный (дата обращения: 25.07.2022).

12. BERT [Электронный ресурс]. – URL: <https://gitlab.com/>, свободный (дата обращения: 25.07.2022).

13. FastText [Электронный ресурс]. – URL: [https://huggingface.co/docs/transformers/model\\_doc/bert](https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/bert), свободный (дата обращения: 25.07.2022).

Kurtukova A.V., Romanov A.S., Fedotova A.M., Shelupanov A.A.

### Intelligent System Architecture for Identification of the Source Code Author

The development of solutions for identifying the source code author is relevant for the field of intellectual property and copyright protection. Such solutions are important for the analysis of the industrial software product source codes, which are developed on the basis of a large number of professional studies. This paper presents the architecture of the intelligent system for identifying the source code author based on a deep hybrid neural network. The paper also describes the main structural elements of the system being developed and their interfaces, as well as the mechanisms necessary for its correct and high performance.

**Keywords:** software system, source code, machine learning, author, deep neural networks.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-39-44

### References

1. Romanov A.S., Shelupanov A.A., Bondarchuk S.S. Generalized authorship identification technique]. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, vol. 1, no. 21. pp. 108–112 (in Russ.).

2. Kurtukova A.V., Romanov A.S. [Identification author of source code by machine learning methods]. *SPIIRAS Proceedings*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 741–765 (in Russ.).

3. Caliskan-Islam A., Harang R., Liu A. Deanonymizing programmers via code stylometry. *Proceedings of the 24th USENIX Security Symposium*, 2015, pp. 255–270. Available at: <https://www.usenix.org/system/files/conference/usenix-security15/sec15-paper-caliskan-islam.pdf>, free (Accessed: July 25, 2022).

4. Git Blame Who? Stylistic Authorship Attribution of Small, Incomplete Source Code Fragments. arXiv preprint arXiv:1701.05681. 2017. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1701.05681.pdf>, free (Accessed: July 25, 2022).

5. Alsulami B., Dauber E., Harang R., Mancoridis S., Greenstadt R. Source Code Authorship Attribution using Long Short-Term Memory Based Networks. *Proceedings of the 22nd European Symposium on Research in Computer Security*, Oslo, Norway, September 11–15, 2017. Part I. pp. 65–82. Available at: <https://www.cs.drexel.edu/~greenie/stylometry-esorics.pdf>, free (Accessed: July 25, 2022).

6. Kurtukova A., Romanov A., Shelupanov A. Source Code Authorship Identification Using Deep Neural Networks. *MDPI Symmetry*, 2020, no. 12. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/12/2044>, free (Accessed: July 25, 2022).

7. Wang N., Ji S. Integration of Static and Dynamic Code Stylometry Analysis for Programmer De-anonymization. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security*, 2018, pp. 74–84. Available at: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3270101.3270110>, free (Accessed: July 25, 2022).

8. Tennyson, M.F. ASAP: A Source Code Authorship Program. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 2019. Vol. 21. pp. 471–484.

9. Burrows, S., Tahaghoghi, S.: Source code authorship attribution using *n*-grams. *Proceedings of the 12-th Australasian Document Computing Symposium*, 2007. Available at: [https://www.icsd.aegean.gr/publication\\_files/982250907.pdf](https://www.icsd.aegean.gr/publication_files/982250907.pdf), free (Accessed: July 25, 2022)

10. JPlag. Available at: <https://jplag.ipd.kit.edu/>, free (Accessed: July 25, 2022).

#### Куртукова Анна Владимировна

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-905-991-67-13  
Эл. почта: [av.kurtukova@gmail.com](mailto:av.kurtukova@gmail.com)

#### Романов Александр Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КИБЭВС ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-26  
Эл. почта: [alexh.romanov@gmail.com](mailto:alexh.romanov@gmail.com)

#### Федотова Анастасия Михайловна

Студент каф. безопасности информационных систем (БИС) ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-923-444-41-25  
Эл. почта: [fedotova.a.747@e.tusur.ru](mailto:fedotova.a.747@e.tusur.ru)

#### Шелупанов Александр Александрович

Д-р техн. наук, проф., президент ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 90-71-55  
Эл. почта: [saa@tusur.ru](mailto:saa@tusur.ru)

11. GitLab. Available at: <https://gitlab.com/>, free. (Accessed: July 25, 2022).

12. BERT. Available at: [https://huggingface.co/docs/transformers/model\\_doc/bert](https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/bert), free (Accessed: July 25, 2022).

13. FastText. Available at: <https://fasttext.cc/>, free (Accessed: July 25, 2022).

---

**Anna V. Kurtukova**

Postgraduate student, Department of Complex Information Security of Electronic Computer Systems (KIBEVS), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-905-991-67-13  
Email: av.kurtukova@gmail.com

**Aleksandr S. Romanov**

Candidate of Science in Engineering, KIBEVS, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-34-26  
Email: alexx.romanov@gmail.com

**Anastasia M. Fedotova**

Student, Department of Information System Security (BIS), TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-923-444-41-25  
Email: fedotova.a.747@e.tusur.ru

**Alexandr A. Shelupanov**

Doctor of Science in Engineering, Professor,  
President of TUSUR University  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 90-71-55  
Email: saa@tusur.ru

УДК 004.934.2

Д.И. Новохрестова, Е.Ю. Костюченко, И.А. Ходашинский

## Алгоритм и методика количественной оценки схожести речевых сигналов

Предложено решение задачи автоматизированной количественной оценки произношения слогов в рамках оценки качества речи в речевой реабилитации. Представлен алгоритм количественной оценки схожести двух звуковых сигналов различной длины с использованием гибридной меры совпадения. Гибридная мера основана на расчете трех метрик (DTW-расстояние, коэффициент корреляции и метрика Минковского) и нечетком классификаторе в качестве механизма комбинации рассчитанных значений по метрикам. Среднее количество совпадений оценок, получаемых с использованием предложенного алгоритма, и оценок по ранее применяемой методике составляет 83%. Предложенная методика оценки схожести речевых сигналов с использованием нескольких опорных сигналов позволяет учитывать вариативность речи и индивидуальные особенности произношения фонем. Учет особенностей возможен при использовании в качестве опорных сигналов предоперационной речи пациента, проходящего речевую реабилитацию.

**Ключевые слова:** алгоритм оценки схожести, оценка качества речи, речевая реабилитация.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-45-51

Увеличение количества впервые диагностированных случаев онкологических заболеваний органов речевого тракта [1, 2] привело к необходимости автоматизации процесса оценки качества речи. Оценка речи является неотъемлемой частью речевой реабилитации, которая требуется после хирургического этапа комбинированного лечения рака полости рта и ротоглотки. При этом сам процесс реабилитации и оценки должен иметь персонализированный подход согласно концепции развития здравоохранения России и национальному проекту «Здравоохранение».

### Методы оценки качества речи

Глобально методы оценки качества речи можно разделить на две группы: объективные и субъективные. Под объективными в большинстве случаев понимается расчет количественного показателя через оценку значений параметров речевого сигнала, под субъективными – оценка с использованием мнений экспертов (аудиторов).

Самыми известными и часто используемыми объективными методами оценки являются подходы, основанные на сравнении исходного сигнала и этого же сигнала после проведения манипуляций над ним (передача по каналам связи, обработка и др.), или оценки параметров речевой составляющей/шума внутри сигнала. К этим методам можно отнести PESQ [3, 4], PSQM [3], E-model [5] и метод, основанный на оценке соотношения сигнал/шум (SNR и segSNR) [6]. Относительно решаемой задачи эти методы обладают существенными недостатками. В случае сравнения с исходным сигналом подразумевается, что и исходный, и искаженный сигнал является одной и той же реализацией некоторого набора фонетических единиц. В случае расчета параметров сигнала не учитывается понятность и корректность произносимой речи.

Если говорить про субъективные оценки, то эталонным методом при передаче по каналам связи является метод MOS [7]. Этот метод подразумевает

экспертное оценивание, при этом предъявляются строгие требования к группе аудиторов (экспертов).

Ранее применяемая в речевой реабилитации методика основана на экспертной оценке произношения слогов по ГОСТ Р 50840–95 «Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости» [8]. Стандарт описывает методику оценки слоговой разборчивости группой аудиторов. Реальное применение стандарта в речевой реабилитации имеет следующие недостатки: невозможность сбора полной группы аудиторов (по стандарту – от пяти человек, в практике – один эксперт-логопед), список произносимых слогов не адаптирован под особенности изменения речи постоперационных пациентов, список слогов быстро запоминается экспертом, оценка каждого слога по отдельности является бинарной (1 – слог произнесен полностью корректно, 0 – иначе). Поэтому была сформулирована задача разработки алгоритма и методики количественной оценки схожести речевых сигналов. Алгоритм позволяет оценить схожесть двух речевых сигналов различных длин на основе гибридной меры расчета, а учитывающая особенности речи диктора методика – оценить произношение слога с использованием нескольких опорных сигналов.

Цель работы – повысить эффективность оценки речи в речевой реабилитации за счет автоматизации процесса получения количественной оценки качества речи и учета индивидуальных особенностей пациента.

### Гибридная мера расчета

В алгоритме количественной оценки схожести двух речевых сигналов предложено использовать гибридную меру расчета. Гибридная мера представляет собой комбинацию трех метрик: DTW-расстояния, коэффициента корреляции и метрики Минковского. В качестве механизма комбинирования используется нечеткий классификатор.

Использованные метрики и анализ результатов их расчета по отдельности описаны в [9]. Однако

при таком подходе к их использованию возникает задача ручного подбора порогового значения для бинаризации оценок, что приводит к невозможности полной автоматизации процесса получения оценки. Поэтому предложено использовать комбинацию метрик, где итоговое значение оценки является выходом нечеткого классификатора [10]. На вход нечеткому классификатору подаются три значения, рассчитанные по вышеуказанным метрикам.

Для обучения классификатора использовались результаты оценки аудиозаписей произношения слогов реальными пациентами, прошедшими речевую реабилитацию в НИИ онкологии г. Томска. Эксперимент и используемый нечеткий классификатор описаны в [11]. Для каждой группы фонем был обучен отдельный классификатор, точности классификации для тестовых и обучающих выборок приведены в табл. 1. Точности были получены на 10-кратной кроссвалидации. Средняя точность для тестовых выборок составила 0,83. Полученные значения точностей на тестовых выборках являются точечными оценками относительной частоты случаев правильно выставленной метки класса относительно общего объема тестовой выборки. В табл. 1 представлены доверительные интервалы для полученных значений согласно интервальной оценке неизвестной вероятности по относительной частоте [12] (заданный уровень надежности 0,95).

Таблица 1  
Точности классификации для групп фонем

Группа фонем	Тестовая выборка	Обучающая выборка
Группа [к] и [к']	0,87 ± 0,021	0,88
Группа [с] и [с']	0,84 ± 0,022	0,85
Группа [т] и [т']	0,79 ± 0,025	0,81

#### Алгоритм количественной оценки схожести

На вход алгоритму подаются два аудиосигнала с одинаковыми характеристиками самих сигналов (частота дискретизации, формат аудиофайла). Аудиосигналы содержат разные реализации одного и того же слога. Длины аудиосигналов могут быть (и в большинстве случаев являются) различными. Также на вход подается указание на проблемную фонему в записанном слоге для применения построенного классификатора или выбора метрики DTW в качестве итоговой.

С учетом подобранных параметров итоговый алгоритм представляет собой следующую последовательность шагов:

Шаг 1. Преобразование сигналов в последовательность значений. Оба сигнала преобразуются в массив значений амплитуд сигналов – числовые последовательности.

Шаг 2. Временная нормализация двух числовых последовательностей – приведение последовательностей к единой длине. Этот шаг выполняется с использованием алгоритма динамической трансформации временной шкалы – DTW-алгоритм [13, 14].

Шаг 3. Фиксируется одна из количественных оценок – DTW-расстояние. Это значение стоимости

пути между двумя последовательностями – последний элемент матрицы преобразований.

Шаг 4. На основе матрицы преобразований и построенного на шаге 2 оптимального пути составляются трансформированные числовые последовательности.

Шаг 5. Нахождение количественных оценок между трансформированными числовыми последовательностями с использованием двух метрик: коэффициента корреляции и метрики Минковского (параметр  $p = 3$ ).

Шаг 6. Для выбранной проблемной фонемы выбирается нечеткий классификатор, обученный для данной группы проблемных фонем. Если фонема не входит в список выделенных проблемных фонем, то делается указание на это.

Шаг 7. Итоговая количественная оценка находится как выход нечеткого классификатора (на вход подаются значения DTW-расстояния, коэффициента корреляции и метрики Минковского) в случае оценки слога с одной из выделенных проблемных фонем или как DTW-расстояние иначе.

Шаг 8. Вывод итоговой оценки.

На рис. 1 приведено графическое представление алгоритма в виде NS-диаграммы [15].

#### Методика оценки схожести речевых сигналов на основе нескольких опорных

Предложенный выше алгоритм позволяет количественно оценить схожесть двух звуковых сигналов при их представлении в виде числовых последовательностей. Однако такую оценку, представляющую собой положительное действительное число, невозможно однозначно интерпретировать в контексте оценки схожести речи к эталонной (в рамках решаемой задачи – предоперационной) речи конкретного пациента. Предлагаемая методика оценки схожести звуковых сигналов за счет применения нескольких опорных сигналов позволяет получить интерпретируемую оценку схожести произношения в заранее известном интервале значений. Использование нескольких опорных сигналов позволяет учитывать вариативность речи до операции. По предлагаемой методике можно оценить подобие звуковых сигналов, представляющих одинаковую по содержанию фонетическую единицу речи – слог. То есть можно сравнивать между собой записи только одного и того же слога.

Примем следующие обозначения:

- эталонный сеанс – сеанс записи речи пациента, проводимый до проведения хирургического лечения, речь близка к нормальной;
- эталонный набор записей/аудиосигналов – записанные в процессе эталонного сеанса оценки речи аудиосигналы;
- эталонная запись – одна запись из эталонного набора;
- оцениваемый сеанс – сеанс записи речи пациента на одном из этапов речевой реабилитации, речь пациента может быть искажена, так и близка к нормальной (зависит от времени проведения сеанса и состояния речевого аппарата пациента);

Получить числовую последовательность 1 из аудиофайла речевого сигнала 1			
Получить числовую последовательность 2 из аудиофайла речевого сигнала 2			
Применить DTW-алгоритм к числовым последовательностям 1 и 2			
Запомнить значение $Y$ - DTW-расстояние (значение последнего элемента матрицы преобразований)			
Получить трансформированные числовые последовательности 1 и 2 согласно матрице преобразований и кратчайшему пути			
Вычислить значение $Z$ – коэффициент корреляции Пирсона между трансформированными числовыми последовательностями 1 и 2			
Вычислить значение $W$ – расстояние по метрике Минковского между трансформированными числовыми последовательностями 1 и 2			
Выбрать проблемную фонему			
[к] или [к']	[с] или [с']	[т] или [т']	Иначе
Получить $C$ как выход нечеткого классификатора FC1 (вход – $Y, Z, W$ )	Получить $C$ как выход нечеткого классификатора FC2 (вход – $Y, Z, W$ )	Получить $C$ как выход нечеткого классификатора FC3 (вход – $Y, Z, W$ )	$C = Y$
Вывести количественную оценку $C$			

Рис. 1. Алгоритм нахождения количественной оценки схожести двух речевых сигналов различной длины

– оцениваемый набор записей – записанные в процессе оцениваемого сеанса оценки речи аудио-сигналы, оценка которого должна быть получена по предложенной методике;

– оцениваемая запись – одна запись из оцениваемого набора.

Опорными сигналами служат эталонные записи из нескольких эталонных сеансов. С точки зрения теоретического решения поставленной задачи количество опорных сигналов ограничено только вычислительными возможностями, большее количество опорных сигналов позволит учитывать большую вариативность речи. С практической точки зрения в речевой реабилитации рекомендуемым количеством опорных сигналов, а следовательно, и эталонных сеансов, являются два сигнала и два сеанса соответственно. Это количество позволяет учитывать вариативность речи, в то же время запись такого количества сеансов возможна в процессе проведения предоперационной подготовки. Рекомендовано проводить запись эталонных сеансов в разные дни или с перерывом в несколько часов в течение одного дня. Это способствует уменьшению нагрузки на органы речевого аппарата.

Методика заключается в выполнении следующей последовательности действий:

1. Выбор нескольких эталонных записей из нескольких эталонных сеансов и оцениваемой записи из оцениваемого сеанса. Все записи представляют собой реализацию одного и того же слога.

2. Нахождение количественных оценок между парами эталонных записей по алгоритму, описанному ранее.

3. Нахождение среднего значения количественных оценок, полученных в пункте 2.

4. Нахождение количественных оценок между каждой из эталонных записей и оцениваемой записью по алгоритму.

5. Нахождение среднего значения количественных оценок, полученных в пункте 4.

6. Нахождение отношения среднего значения оценок между эталонными и оцениваемым сигналами к среднему значению оценок между эталонными сигналами – относительная оценка оцениваемого сигнала.

7. Вывод о схожести оцениваемого сигнала и эталонных по относительной оценке.

Относительная оценка заключена в интервал от 0 до 1 (включая обе границы), и чем качественнее (более похоже на эталон) произнесен слог, тем ближе результат к 1.

Само отношение средних оценок теоретически может быть больше 1, это означает, что оцениваемая речь максимально схожа с эталонной и речь пациента не нуждается в речевой реабилитации с точки зрения анализа количественной оценки схожести речевых сигналов. В таком случае окончательное решение о необходимости проведения реабилитации принимается лечащим врачом – логопедом. Если отношение в процессе вычисления получается больше 1, то, согласно алгоритму расчета, относительная оценка принимается равной 1.

Относительная оценка может принимать значение 1 при условии полного восстановления речи до предоперационного уровня. Если рассматривать с точки зрения наличия предпосылок, то все из них

говорят об ухудшении речи пациента после проведения оперативного вмешательства и невозможности достижения предоперационного уровня. Проведенное оперативное вмешательство (зачастую резекция одного из органов речевого аппарата) приводит к невозможности полного восстановления правильного произношения всех проблемных фонем. Анализ аудиозаписей пациентов НИИ онкологии г. Томска до и после хирургического лечения, в процессе и после речевой реабилитации подтверждает описанные предпосылки.

Методика оценки схожести речевых сигналов при наличии двух эталонных (опорных) сигналов может быть представлена в виде следующего алгоритма:

1. Выбрать два эталонных сеанса  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  (опорные сеансы).

2. Выбрать сеанс для оценки (оцениваемый сеанс)  $o$ .

Для первого слога в оцениваемом сеансе:

3. Найти оценку слогу по алгоритму для пар  $o-\varepsilon_1$ ,  $o-\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_1-\varepsilon_2$ :  $C_{o,\varepsilon_1}$ ,  $C_{o,\varepsilon_2}$ ,  $C_{\varepsilon_1,\varepsilon_2}$ .

4. Найти относительную оценку сигнала  $C_o$ :

4.1.  $C_{o,\varepsilon} = (C_{o,\varepsilon_2} + C_{o,\varepsilon_1}) / 2$  – среднее значение оценок в парах (оцениваемая-эталонная).

4.2. Относительная оценка  $C_o = C_{o,\varepsilon} / C_{\varepsilon_1,\varepsilon_2}$ .

Оценка  $C_o$  в интервале  $[0;1]$ . Чем ближе к 1, тем лучше.

5. Повторить шаги 3–4 для остальных слогов в сеансе.

6. Найти оценку сеанса как среднее арифметическое оценок слогов, входящих в оцениваемый сеанс.

Описанная последовательность действий в виде NS-диаграммы представлена на рис. 2.

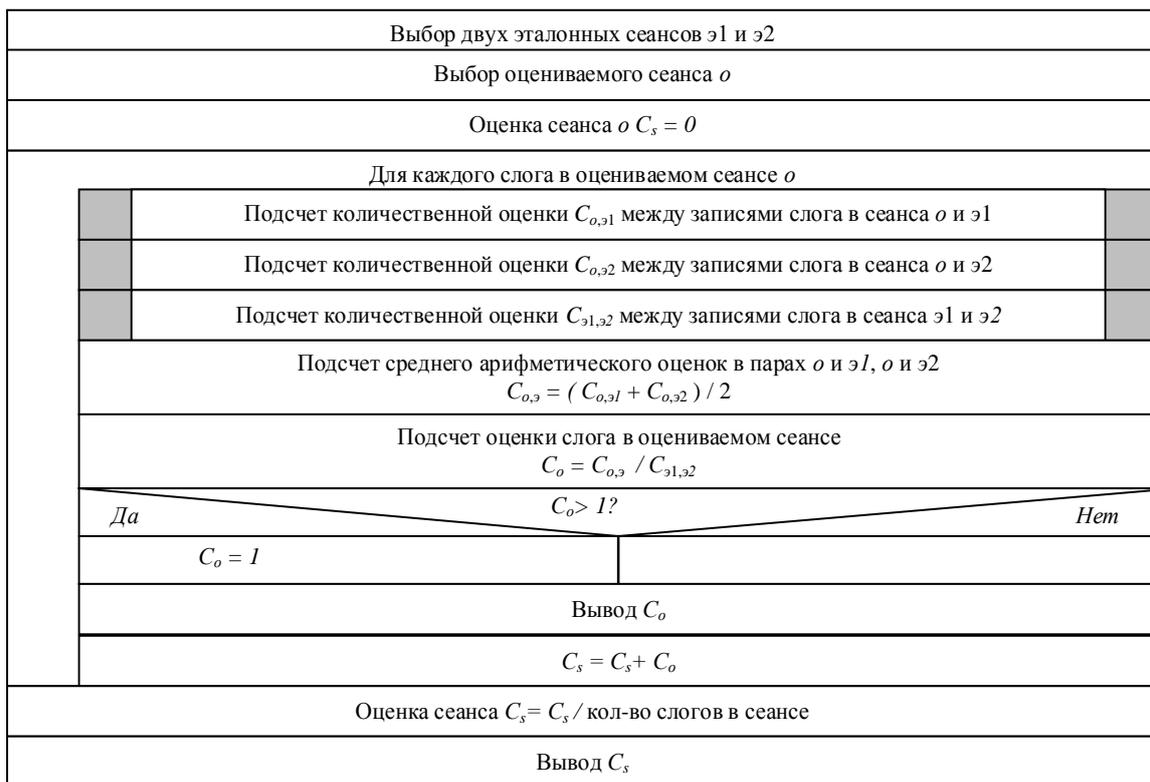


Рис. 2. Методика оценки при двух эталонных сеансах

### Сравнение оценок по методике с использованием эталонных сеансов от разных дикторов

Использование в качестве эталонных сигналов записей речи того же пациента (диктора), чью речь необходимо оценить, позволяет учитывать особенности речи пациента, в то время как использование в качестве эталона записей другого человека даже с идеальным произношением приводит к существенному занижению оценки качества произношения слогов.

Было рассчитано, как изменяется оценка сеанса в зависимости от набора эталонных сеансов и их принадлежности тому или иному диктору. Были выбраны сеансы, в которых речь диктора близка к иде-

альной, т.е. оценка по старой методике большинства записей в сеансе была бы равна единице (допускалось не более пяти возможных «нулей» в оценках). В табл. 2 приведен пример сравнения оценок. В сеансах S1 и S2 диктора D1 и сеансах S4 и S5 диктора D2 все слоги были произнесены правильно (оценки произношения равны единицам), в сеансе S3 диктора D1 было допущено четыре ошибки (в слогах была неправильно произнесена проблемная фонема, остальные фонемы – правильно).

Из данных таблицы видно, что использование в качестве эталона сеансов другого диктора приводит к занижению оценок произношения слогов.

Для установления и проверки направленности изменений получаемых оценок были получены

оценки сеансов четырех пациентов. Для каждого из пациентов была проведена оценка на основе сравнения с сеансами этого же пациента и с сеансами других пациентов/дикторов. Проверка производилась с использованием критерия Вилкоксона [12].

Таблица 2  
Сравнение оценок сеанса с использованием эталонных сеансов разных дикторов

Оцениваемый сеанс	Эталонные сеансы			
	D1			D2
	S1 + S2	S1 + S3	S2 + S3	S4 + S5
S1	–	–	0,716	0,252
S2	–	0,982	–	0,296
S3	0,992	–	–	0,383

Для подсчета значения критерия были получены разности значений оценок сеанса, а также проведена ранжировка полученных значений разности. Наблюдаемое значение критерия Вилкоксона представляет собой сумму рангов нетипичных сдвигов. Все сдвиги (разности) значений оценок имеют одинаковую направленность, т.е. при использовании в качестве эталонов сеансов этого же пациента значения оценки больше, чем в случае использования сеансов другого диктора. Поэтому наблюдаемое значение критерия Вилкоксона равно 0. Критическое значение для объема выборки  $n = 36$  и уровня значимости 0,01 равно 185. На основе полученных значений была принята нулевая гипотеза о том, что оценки сеансов пациента, полученные с использованием эталонных сеансов этого же пациента, превосходят оценки, получаемые с использованием эталонных сеансов другого пациента. Поэтому использование в качестве эталона предоперационной речи пациента в предложенной методике позволяет учитывать индивидуальные особенности речи пациента.

**Заключение**

Предложенный в работе алгоритм с применением временной нормализации и гибридной меры совпадения предназначен для количественной оценки схожести двух речевых сигналов. Используемая в алгоритме гибридная мера оценки схожести основана на расчете DTW-расстояния, коэффициента корреляции и расстояния Минковского и применении нечеткого классификатора, на вход которого подаются рассчитанные значения. Для каждой группы проблемных фонем были обучены классификаторы на основе оценок аудиозаписей пациентов НИИ онкологии. Среднее количество совпадений оценок, получаемых по алгоритму, и оценок по ранее используемой методике составило 83%.

Предложенная методика оценки схожести речевых сигналов с применением нескольких опорных сигналов позволяет учитывать вариативность произношения слогов и особенности речи дикторов (пациентов). Получаемые по методике оценки записей слогов и средние оценки сеансов представляют собой интерпретируемые оценки в заранее известном интервале. В [16] описано практическое применение и внедрение предложенных методик в процесс

речевой реабилитации, проводимой после комбинированного лечения онкологических заболеваний органов полости рта и ротоглотки на базе действующего медицинского учреждения – НИИ онкологии г. Томска.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90082.

*Литература*

1. Злокачественные новообразования в России в 2020 году (заболеваемость и смертность) // под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена (филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России), 2021. – 252 с.
2. Состояние онкологической помощи населению России в 2020 году // под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена (филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России), 2021. – 239 с.
3. ITU-T Recommendation P.862: Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.862>, свободный (дата обращения: 17.06.2022).
4. Rix A.W. Perceptual evaluation of speech quality (PESQ)-a new method for speech quality assessment of telephone networks and codecs // 2001 Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 2001. – No. 2. – P. 749–752.
5. Recommendation G.107 (06/15): The E-model: a computational model for use in transmission planning [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.107-201506-I/en>, свободный (дата обращения: 17.06.2022).
6. Способы оценки субъективного качества речи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/177099/>, свободный (дата обращения: 17.06.2022).
7. Streijl R.C. Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives / R.C. Streijl, S. Winkler, D.S. Hands // Multimedia Systems. – 2016. – Vol. 22, No. 2. – P. 213–227.
8. ГОСТ Р 50840–95 Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200027288>, свободный (дата обращения: 17.06.2022).
9. Experimental Analysis of Expert and Quantitative Estimates of Syllable Recordings in the Process of Speech Rehabilitation / D. Novokhrestova, E. Kostuchenko, I. Hodashinsky, L. Balatskaya // Lecture Notes in Computer Science. – 2021. – Vol. 12997 LNAI. – P. 483–491.
10. Корушев Н.П. Алгоритм формирования базы правил нечеткого классификатора на основе алгоритма кластеризации k-средних и метаэвристического алгоритма «китов» / Н.П. Корушев, И.А. Ходашинский // Доклады ТУСУР. – 2021. – Т. 24, № 1. – С. 42–47.
11. Новохрестова Д.И. Гибридная мера для сравнения записей слогов // Сб. избр. статей научной сессии ТУСУР: в 3 т. – Томск: В-Спектр, 2022. – Т. 2. – С. 75–79.
12. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – 10-е изд., стереотипное. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
13. Романенко А.А. Выравнивание временных рядов: прогнозирование с использованием DTW [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jmla.org/papers/doc/2011/>

no1/Romanenko2011Dynamic.pdf, свободный (дата обращения: 17.06.2022).

14. Salvador S. Fastdtw: Toward accurate dynamic time warping in linear time and space / S. Salvador, P. Chan // Workshop on Mining Temporal and Sequential Data, Seattle. – 2004. – P. 70–80.

15. Nassi I. Flowchart Techniques for Structured Programming / I. Nassi, B. Shneiderman // ACM SIGPLAN Notices. – 1973. – Vol. 8, No. 8. – P. 12–26.

16. Восстановление речевой функции у больных раком полости рта и ротоглотки с использованием инновационных технологий / Л.Н. Балацкая, Е.Л. Чойзонов, Е.А. Красавина, Е.Ю. Костюченко, Д.И. Новохрестова // Вопросы онкологии. – 2020. – Т. 66, № 3. – С. 247–251.

### Новохрестова Дарья Игоревна

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID ID: 0000-0002-4931-1681  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29  
Эл. почта: ndi@fb.tusur.ru

### Костюченко Евгений Юрьевич

Канд. техн. наук, доцент, доцент каф. КИБЭВС ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID ID: 0000-0001-8000-2716  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29  
Эл. почта: key@keva.tusur.ru

### Ходашинский Илья Александрович

Д-р техн. наук, профессор каф. КИБЭВС ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID ID: 0000-0002-9355-7638  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29  
Эл. почта: hia@fb.tusur.ru

Novokhrestova D.I., Kostyuchenko E.Y., Hodashinsky I.A.  
**Algorithm and method for quantitative assessment of the speech signals similarity**

The paper proposes a method to solve the task of automated quantitative assessment of the syllable pronunciation. This quantitative assessment is used to evaluate the speech quality during speech rehabilitation. An algorithm for quantifying the similarity of two audio signals of different lengths is presented. The algorithm uses a hybrid match measure. The hybrid measure is based on calculation of three metrics (DTW-distance, correlation coefficient and Minkowski metric) and using a fuzzy classifier as a mechanism for combining the calculated values. The average number of coincidences of estimates by the proposed algorithm and estimates by the previously applied method is 83%. A method for quantifying the similarity of speech signals using several reference signals is proposed. The method allows to consider the variability of speech and the individual characteristics of the phoneme's pronunciation. This is achieved by using records of the patient's preoperative speech as reference signals.

**Keywords:** similarity assessment algorithm, speech quality assessment, speech rehabilitation.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-45-51

### References

1. *Zlokachestvennyye novoobrazovaniya v Rossii v 2020 godu (zabolevaemost' i smertnost')* [Malignant neoplasms in Russia in 2020 (morbidity and mortality)]. Moscow, National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, 2021. 252 p. (in Russ.)

2. *Sostoyanie onkologicheskoi pomoshchi naseleniyu Rossii v 2020 godu* [The state of oncological care for the population of Russia in 2020]. Moscow, National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, 2021, 239 p. (in Russ.)

3. ITU-T Recommendation P.862: Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs. Available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.862> (Accessed: June 17, 2022).

4. Rix A.W. Perceptual evaluation of speech quality (PESQ)-a new method for speech quality assessment of telephone networks and codecs. *2001 Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2001, no. 2, pp. 749–752.

5. Recommendation G.107 (06/15): The E-model: a computational model for use in transmission planning. Available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.107-201506-I/en> (Accessed: June 17, 2022).

6. *Sposoby otsenki sub'ektivnogo kachestva rechi* [Methods for assessing the subjective quality of speech]. Available at: <https://habrahabr.ru/post/177099/> (Accessed: June 17, 2022).

7. Streijl R.C., Winkler S., Hands D.S. Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives. *Multimedia Systems*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 213–227.

8. GOST R 50840–95. Speech transmission over varies communication channels. Techniques for measurements of speech quality, intelligibility and voice identification. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200027288> (Accessed: June 17, 2022)

9. Novokhrestova D., Kostuchenko E., Hodashinsky I., Balatskaya L. Experimental Analysis of Expert and Quantitative Estimates of Syllable Recordings in the Process of Speech Rehabilitation. *Lecture Notes in Computer Science*, 2021, vol. 12997 LNAI, pp. 483–491.

10. Koryshev N.P., Hodashinsky I.A. Algorithm to forming a rule base for a fuzzy classifier designed on the basis of the K-means clustering algorithm and the whale optimization algorithm. *Proceedings of TUSUR University*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 42–47. DOI: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-42-47 (in Russ.)

11. Novokhrestova D. I. *Gibridnaya mera dlya sravneniya zapisei slogov* [Hybrid measure for comparing syllable records]. *Sbornik izbrannykh statei nauchnoi sessii TUSUR* [Collection of selected articles of TUSUR Scientific Session]: in 3 part. Tomsk: V-Spektr, 2022 – Tomsk: B-Spektr, 2022, part. 2, pp. 75–79 (in Russ.).

12. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Probability Theory and Mathematical Statistics: Textbook for Universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004, 479 p.

13. Romanenko A.A. *Sposoby otsenki sub'ektivnogo kachestva rechi* [Time Series Flattening: Forecasting with DTW]. Available at: <http://jmla.org/papers/doc/2011/no1/Romanenko2011Dynamic.pdf> (Accessed: June 17, 2022).

14. Salvador S., Chan P. Fastdtw: Toward accurate dynamic time warping in linear time and space. *Workshop on Mining Temporal and Sequential Data*, Seattle, 2004, pp. 70–80.

15. Nassi I., Shneiderman B. Flowchart Techniques for Structured Programming. *ACM SIGPLAN Notices*, 1973, vol. 8, no. 8, pp. 12–26.

16. Balatskaya L.N., Choinzonov E.L., Krasavina E.A., Kostyuchenko E.Y., Novokhrestova D.I. [Voice restoration in patients with oral cavity and oropharyngeal cancers using innovative technologies]. *Problems in Oncology*, 2020, vol. 66, no. 3, pp. 247–251. DOI: 10.37469/0507-3758-2020-66-3-247-251 (in Russ.).

**Evgeny Y. Kostyuchenko**

Candidate of Science in Engineering, Assistant Professor, KIBEVS TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID ID: 0000-0001-8000-2716  
Phone: +7 (382-2) 70-15-29  
Email: key@keva.tusur.ru

---

**Darya I. Novokhrestova**

Postgraduate student, Department of Complex Information Security of Electronic Computer Systems (KIBEVS), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID ID: 0000-0002-4931-1681  
Phone: +7 (382-2) 70-15-29  
Email: ndi@fb.tusur.ru

**Илья А. Ходашинский**

Doctor of Science in Engineering, Professor, KIBEVS TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID ID: 0000-0002-9355-7638  
Phone: +7 (382-2) 70-15-29  
Email: hia@fb.tusur.ru

УДК 004.413

Д.О. Змеев, О.А. Змеев, Л.С. Иванова, В.И. Фрейдин

## Разработка подсистемы работы с байесовскими сетями для системы поддержки принятия решений в управлении проектами по разработке программного обеспечения

В настоящий момент байесовские сети являются популярным методом для решения различных задач, в том числе для создания инструментов поддержки принятия решений. Предлагается решение для создания байесовской сети и прямого вероятностного вывода. Спецификой задачи является работа с крупными сетями (более 200 вершин) с большим количеством вершин-родителей у одной вершины (15 и более). Инструмент интегрирован с Redmine и позволяет рассчитать вероятность ошибки менеджера при определении текущего состояния проекта.

**Ключевые слова:** байесовская сеть, SEMAT, Essence, графовая СУБД.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-52-56

В области управления проектами по разработке программного обеспечения достаточно сложно найти и использовать практически применимую прикладную математическую или алгоритмическую модель, которая позволила бы управлять проектами с использованием структурированных и(или) оптимизационных механизмов. Частично это связано с двойкой природой проектов по разработке программного обеспечения, в которой существуют, с одной стороны, достаточно строгий технологический процесс, а с другой стороны, творческая природа поиска наиболее подходящей конфигурации программного обеспечения для нужд стейкхолдеров.

В попытках разработать подход, который учитывал бы эту противоречивую природу, но не требовал от команд по разработке программного обеспечения существенных ресурсных затрат на поддержку, авторы статьи разрабатывают комплексное решение в форме системы поддержки принятия решений, которое построено на стандарте OMG для языка Essence [1]. Данный язык содержит структурированное описание абстрактного состояния прогресса проекта, которое впоследствии можно использовать для построения прикладных математических моделей, в частности, байесовских сетей [2].

Вершины байесовской сети соответствуют чекпоинтам (контрольным точкам) проекта, которые фиксируют истинность или ложность утверждений, соответствующих семантическому описанию достигнутого в проекте прогресса, например «Key technical risks agreed to» (ключевые технические риски согласованы). С помощью экспертной оценки определены зависимости между чекпоинтами, которые трансформируются в рёбра байесовской сети. Результатом работы системы является вероятность ошибки менеджера – вероятность ложноположительной ошибки менеджера относительно истинности утверждения о состоянии проекта. Для использования предложенной модели на практике возникла потребность в инструменте, позволяющем моделировать сеть и производить расчеты.

В результате разработки первой версии исследовательского прототипа была построена байесов-

ская сеть, включающая 646 вершин. Наибольшее число вершин-родителей для одной вершины составляет 15. Структура сети, а также значения вероятностных векторов были описаны в JSON-файле и импортировались в плагин для Redmine [3] при подготовке к вычислению прямого вероятностного вывода. Для продолжения исследований необходимо добавить возможность учета практик, используемых командой при разработке ПО, в связи с чем разработанное решение перестало удовлетворять требованиям. Возникла задача поиска нового решения.

Необходимо отметить, что спецификой задачи является отсутствие выборки данных, которую можно было бы использовать для статистических (например, непараметрический регрессионный анализ) или других, более классических подходов машинного обучения. Данный факт обычно является существенным ограничением применимости подходов, не основанных на строгом представлении проекта (например, сетевых планов графиков проекта). Однако байесовские сети как инструмент допускают использование экспертных оценок вместо или вместе с обучением на основе данных. Также в качестве дополнительных требований, следующих из общей проблематики задачи, можно выделить следующие:

1. Поддержка дискретной байесовской сети с большим количеством вершин (более 1000). Базовая сеть для чекпоинтов альфы Software System содержит 646 вершин, однако дальнейшие планы по использованию больших возможностей стандарта OMG Essence подразумевают существенный рост числа вершин в сети.

2. Поддержка работы с большим количеством у конкретной вершины сети вершин-родителей (более 20 вершин-родителей) с адекватным временем расчета вероятностей. Наибольшее число родителей у вершины базовой сети – 15, добавление новых практик влечет за собой появление новых зависимостей, т.е. увеличение максимально возможного числа вершин-родителей. Данное требование влияет и на модель хранения информации о сети, используемой инструментом, поскольку, при увеличении числа вершин-родителей соответствующий вершине веро-

ятностный вектор растет очень быстро (его длина равна  $2^n$ , где  $n$  – число вершин-родителей), что отрицательно влияет на размер файла с данными о сети и затрудняет работу с ним.

3. Возможность быстрого перестроения сети с добавлением новых вершин. Поскольку важным функциональным требованием разрабатываемой системы является возможность учета дополнительных практик, используемых командой в процессе разработки ПО, каждая новая практика и проводимые в ее рамках активности могут быть причиной добавления новых вершин и ребер, что требует перестроения байесовской сети.

4. Возможность интеграции с внешней системой. Разработка инструмента поддержки принятия решений осуществляется в форме плагина для системы управления проектами Redmine. Используемый для построения сети инструмент должен иметь возможность обмена данными с внешней системой – плагином для Redmine.

5. Наличие бесплатной версии. Поскольку данный проект носит исследовательский характер, а также из-за отсутствия возможности и разумного обоснования для оплаты лицензии на ПО без уверенности в том, что рассматриваемый инструмент удовлетворяет критериям, вопрос наличия бесплатной версии был ключевым.

Наличие графического редактора и/или инструмента визуализации сети не является необходимым требованием, но существенно облегчает работу с сетью.

Целью представленного в данной работе исследования является создание инструмента для работы с байесовской сетью в рамках задачи определения вероятности ошибки менеджера проекта по разработке программного обеспечения.

При создании инструмента были решены следующие задачи:

1. Выбор способа хранения информации о структуре байесовской сети.

2. Реализация взаимодействия между Redmine и инструментом.

Ниже представлено сравнение различных инструментов по работе с байесовскими сетями, дана информация по хранению данных о структуре байесовской сети с помощью графовой СУБД, описана общая архитектура разработанного инструмента. А также представлены результаты реализации и характеристики разработанного инструмента.

#### Сравнительный анализ инструментов по работе с байесовскими сетями

На основе вышеуказанных требований были сформулированы критерии сравнения инструментов для работы с байесовскими сетями: построение крупных сетей (более 1000 вершин), быстрое перестроение сети, возможность интеграции с внешней системой, возможность расчета прямого вероятностного вывода для вершины с 20 родительскими вершинами, возможность импорта созданной ранее сети, наличие бесплатной или условно-бесплатной версии.

В табл. 1 приведены результаты анализа наиболее популярных на момент написания статьи инструментов.

Помимо указанных в табл. 1 критериев, также рассматривалась возможность вычисления прямого вероятностного вывода для узла с 20 родительскими вершинами, но ни один из рассмотренных инструментов не предоставляет такой функционал.

Авторы статьи [11] также столкнулись с необходимостью создания байесовской сети большого размера (десятки тысяч вершин).

Таблица 1

Сравнение инструментов для работы с байесовскими сетями

Критерий	Инструменты						
	AgenaRisk [4]	Bayes Fusion [5]	Netica [6]	BayesiaLab [7]	BayesAML [8]	MSBNx [9]	Bayes Server [10]
Построение крупных сетей (более 1000 вершин)	+	+	+(в платной версии)	+(в платной версии)	+	+	+
Интеграция с внешней системой	+	–	–	+	+	–	+
Импорт сети	+(в платной версии)	+	+(не более 15 вершин для бесплатной версии)	+(не более 15 вершин для бесплатной версии)	+	+	+
Стоимость	Desktop £2,100 Developer £3,100	Бесплатно	Commercial \$685 Educational / Personal \$285	Professional \$42,100 (в год) Academic Edition \$700 (в год)	\$2070	Бесплатно	£675 (в год)

В результате проведенного ими анализа было принято решение разработать собственный инструмент [12], главными особенностями которого являются возможность создания и обучения крупных байесовских сетей и ориентация на работу с геномными данными. В табл. 1 данный инструмент не вошел,

так как анализ инструмента показал невозможность его применения для поставленной задачи, поскольку для его использования требуется набор обучающих данных.

На основании анализа можно сделать вывод о необходимости создания инструмента, удовлетво-

ряющего вышеперечисленным требованиям. Отметим, что основной задачей является построение, сохранение данных о сети и расчет вероятностей. Исходными данными для построения сети являются стандарт OMG Essence и экспертные оценки о наличии зависимостей между утверждениями, полученные коллективом разработчиков и проектных менеджеров компаний «Education ERP», «Kreosoft» и «Сибирские Информационные Системы».

#### Хранение данных о структуре байесовской сети

Поскольку байесовская сеть является направленным ациклическим графом, для хранения информации о ее структуре можно использовать графовые базы данных. Графовые СУБД существенно превосходят другие виды СУБД по производительности при выполнении операций создания, сохранения и внесения изменений в схему базы данных для задач с естественной графовой структурой данных [13]. В качестве СУБД был выбран инструмент Neo4j Graph Database [14], поскольку он предоставляет удобное API для взаимодействия с БД, имеет инструменты визуализации, обширную документацию, а также доступен для бесплатного использования.

Каждая вершина байесовской сети транслируется в вершину графа в БД, зависимости между вершинами сети аналогично становятся зависимостями между вершинами графа. Поскольку расчет вероятности с помощью прямого вероятностного вывода осуществляется для каждой итерации проекта, необходимо сохранять значение вероятности на предыдущей итерации. Для этого в БД планируется создание суррогатных вершин, связанных со всеми остальными вершинами, соответствующими вершинам байесовской сети. Вес ребра между суррогатной вершиной и конкретной вершиной графа будет равен значению вероятности для конкретной вершины на предыдущей итерации.

Каждая вершина графа в БД содержит следующую информацию: идентификатор, имя вершины, перечень родителей вершины в виде строки, соответствующий вероятностный вектор в виде строки.

#### Архитектура системы

Выбор способа хранения информации о структуре байесовской сети повлиял на архитектуру всей системы, поскольку использование СУБД требовало реализации ряда компонентов: компонента взаимодействия с СУБД для создания, изменения и получения данных о структуре сети, компонента взаимодействия с Redmine, компонента для математических расчетов. Разработанные компоненты и их зависимости представлены на рис. 1.

Основная логика, в том числе алгоритм подсчета вероятностей, реализованы на языке Python 3.8. BaseServer предоставляет API для взаимодействия с Redmine, MasterProbability содержит основной алгоритм расчета прямого вероятностного вывода, а модули pyNeoByse и CreateDB отвечают за взаимодействие с СУБД Neo4j. Информация об экспертных оценках, необходимая для расчета вероятностей, представлена в виде JSON-файла.

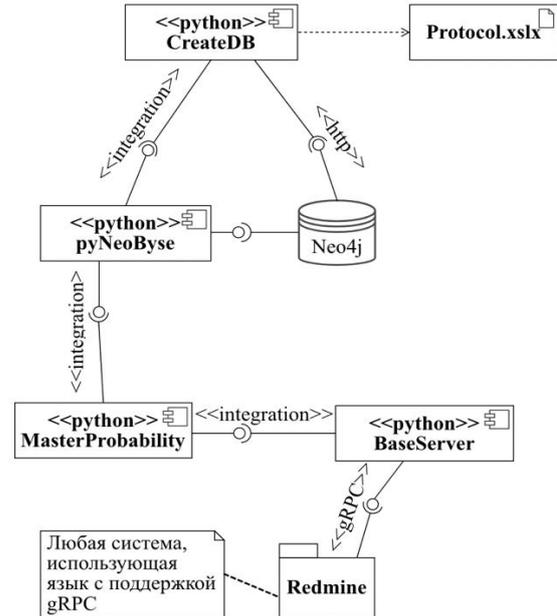


Рис. 1. Компоненты системы

На рис. 2 представлен алгоритм работы инструмента. Байесовская сеть конфигурируется заранее на основе данных об альфах проекта и их чекпоинтах. При запуске расчетов разработанный авторами плагин для Redmine осуществляет сбор информации о расставленных менеджером чекпоинтах альф проекта и отправляет на сервер с помощью API.

Расчет вероятности ошибки менеджера

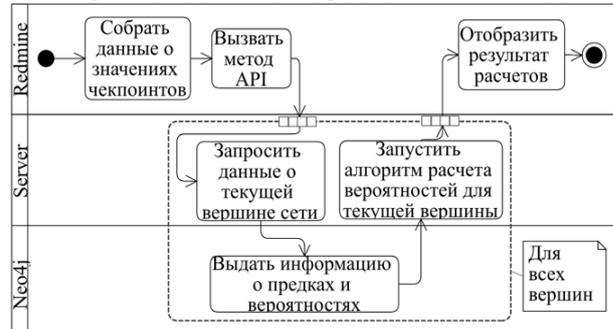


Рис. 2. Взаимодействие частей системы

#### Полученные результаты

В результате с помощью разработанного инструмента была смоделирована сеть с 646 вершинами, 1783 связями (наибольшее число родителей для одной вершины – 15). Для сети с такими параметрами вычисление прямого вероятностного вывода для одной итерации осуществляется за 6,4 с (запуск осуществлялся на оборудовании со следующими характеристиками: процессор Intel(R) Core(TM) i7-9750H, 8 Gb RAM DDR4). Файл со структурированной байесовской сетью и подсчитанными вероятностями доступен по ссылке [15].

В табл. 2 представлен пример результатов вычислений прямого вероятностного вывода, полученный с помощью разработанного инструмента. Подробный разбор алгоритма вычисления вероятностей представлен в работе [16]. Идентификаторы

чекпоинтов формируются по схеме «первая буква названия альфы, номер состояния, номер чекпоинта». На нулевой итерации вероятность ошибки считается нулевой.

Таблица 2

**Результаты работы алгоритма – вероятности истинности утверждений о состоянии проекта (фрагмент)**

Вершина сети	Итерация 0	Итерация 1
O11	0,0	0,0
O12	0,0	0,0422
O13	0,0	0,2202
O21	0,0	0,6387
O22	0,0	0,2554
O23	0,0	0,5233
O24	0,0	0,68
O25	0,0	0,6935
O31	0,0	0,0457
O32	0,0	0,3261
O33	0,0	0,2774
O34	0,0	0,1207
O35	0,0	0,1207
O41	0,0	0,0808
O42	0,0	0,1162
O43	0,0	0,1255
O44	0,0	0,0829

### Выводы

Применение графовой СУБД убирает ограничения на количество вершин в сети, позволяя инструменту удовлетворять требованию № 1. Также снимается ограничение на количество вершин-родителей (с точки зрения проблемы хранения) и выполняется требование о возможности быстрого перестроения сети. Требование об интеграции удовлетворено с помощью API и библиотек для взаимодействия с Neo4j, предоставляемых разработчиком СУБД.

Дальнейшие исследования в области создания инструмента поддержки принятия решений для менеджеров проектов требуют существенного расширения байесовской сети. В текущей версии системы узким местом является вычислительная часть: получение вероятностного вектора и вычисление условной вероятности являются достаточно трудоемкими по времени. Следовательно, возникает задача оптимизации вычислений. Кроме того, с ростом числа вершин сети и количества связей между вершинами неизбежно произойдет увеличение размера вероятностных векторов, что существенно затрудняет их хранение. Возникает вторая задача – решить вопрос хранения вероятностных векторов. Обе задачи являются темой будущей работы авторов статьи.

### Литература

1. The Essence of Software Engineering: Applying the SEMAT Kernel / I. Jacobson, P.-W. Ng, P.E. McMahon, I. Spence, S. Lidman. – Addison-Wesley, 2013. – 224 p.
2. Змеев Д.О. О представлении прогресса проекта по разработке программного обеспечения в форме динамической байесовской сети / Д.О. Змеев, Л.С. Иванова, Р.Р. Рафикова // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ–2020): матер. XIX Междунар. конф. им. А.Ф. Терпугова. – Томск, 2021. – С. 291–297.

3. Redmine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.redmine.org/>, свободный (дата обращения: 10.12.2021).

4. AgenaRisk: Bayesian Network Software for Risk Analysis and Decision Making [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.agenarisk.com>, свободный (дата обращения: 02.02.2022).

5. BayesFusion, LLC. Data Analytics, Modeling, Decision Support [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bayesfusion.com>, свободный (дата обращения: 03.02.2022).

6. Netica Application [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.norsys.com/netica.html>, свободный (дата обращения: 03.03.2022).

7. BayesiaLab 10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bayesia.com>, свободный (дата обращения: 10.02.2022).

8. BayesAML [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hugin.com/bayesaml/>, свободный (дата обращения: 10.02.2022).

9. MSBNx. Bayesian Network Editor and ToolKit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://msbnx.azure-websites.net>, свободный (дата обращения: 15.02.2022).

10. Bayes Server [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bayesserver.com>, свободный (дата обращения: 15.02.2022).

11. Michiels M. BayeSuites: An open web framework for massive Bayesian networks focused on neuroscience / M. Michiels, P. Larrañaga, C. Bielza // Neurocomputing. – 2021. – Vol. 428. – P. 166–181.

12. Bayesian networks – BayeSuites [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://neurosuites.com/morpho/ml\\_bayesian\\_networks](https://neurosuites.com/morpho/ml_bayesian_networks), свободный (дата обращения: 16.02.2022).

13. Robinson I. Graph Databases / I. Robinson, J. Webber, E. Eifrem. – O'Reilly Media, 2013. – 178 p.

14. Neo4j Graph Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neo4j.com/product/neo4j-graph-database/>, свободный (дата обращения: 15.02.2022).

15. Файл со структурированной байесовской сетью и подсчитанными вероятностями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://drive.google.com/file/d/1ez6L5EybuUpW8FTv\\_n3XD9ziwPMfXXAu/view](https://drive.google.com/file/d/1ez6L5EybuUpW8FTv_n3XD9ziwPMfXXAu/view), свободный (дата обращения: 16.05.2021).

16. Змеев Д.О. Прототип системы поддержки принятия решений для управления проектами на основе стандарта OMG Essence и байесовских сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11 / Томский гос. ун-т (Томск), 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/koha:000894552>, свободный (дата обращения: 05.07.2022).

### Змеев Денис Олегович

Ассистент каф. программной инженерии  
Национального исследовательского  
Томского государственного ун-та (НИ ТГУ)  
Ленина пр-т, 36, корп. 2, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 52-97-93  
Эл. почта: denis.zmееv@accounts.tsu.ru

### Змеев Олег Алексеевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. программной инженерии НИ ТГУ  
Ленина пр-т, 36, корп. 2, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 52-97-93  
Эл. почта: ozmeyev@gmail.com

**Иванова Лидия Сергеевна**

Ассистент каф. программной инженерии НИ ТГУ  
Ленина пр-т, 36, корп. 2, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 52-97-93  
Эл. почта: lidiya.ivanova@persona.tsu.ru

**Фрейдин Валерий Игоревич**

Студент высшей ИТ-школы НИ ТГУ  
Ленина пр-т, 36, корп. 2, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 52-97-93  
Эл. почта: www.carat@list.ru

Zmееv D.O., Zmееv O.A., Ivanova L.S., Freyдин V.I.  
**Development of a subsystem to use Bayesian networks  
in a decision support system for software development  
management**

Bayesian networks are currently a popular tool for solving various problems, including creating decision support systems. This paper proposes a tool for creating a Bayesian network and direct probabilistic inference. The specificity of the problem consists in working with large networks (more than 1000 nodes) with a large number of parent nodes at one node (15 or more). The tool is integrated with Redmine and allows you to calculate the probability of a manager's error when determining the current state of the project.

**Keywords:** Bayesian network, SEMAT, Essence, graph DBMS.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-52-56

*References*

1. Jacobson I., Ng P.-W., McMahon P.E., Spence I., Lidman S. *The Essence of Software Engineering: Applying the SEMAT Kernel*. Addison-Wesley, 2013. 224 p.
2. Zmееv D.O., Ivanova L.S., Rafikova R.R. *O predstavlenii progressa proekta po razrabotke programmnogo obespechenija v forme dinamicheskoy bajesovskoj seti* [Presenting the progress of a software development project in the form of a dynamic Bayesian network]. *Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie (ITMM–2020)*. Materialy XIX Mezhdunarodnoj konferencii imeni A.F. Terpugova [Information technologies and mathematical modeling (ITMM–2020). Proceedings of the IX International Conference named after A.F. Terpugov]. Tomsk, 2021, pp. 291–297 (in Russ.).
3. Redmine. Available at: <https://www.redmine.org/>, free. (Accessed: December 10, 2021).
4. AgenaRisk: Bayesian Network Software for Risk Analysis and Decision Making. Available at: <https://www.agenarisk.com>, free (Accessed: February 02, 2022).
5. BayesFusion, LLC. Data Analytics, Modeling, Decision Support. Available at: <https://www.bayesfusion.com>, free (Accessed: February 03, 2022).
6. Netica Application. Available at: <https://www.nor-sys.com/netica.html>, free (Accessed: March 03, 2022).
7. BayesiaLab 10. Available at: <https://www.bayesia.com>, free (Accessed: February 10, 2022).

8. BayesAML. Available at: <https://www.hugin.com/bayesaml/>, free (Accessed: February 10, 2022).

9. MSBNx. Bayesian Network Editor and ToolKit. Available at: <https://msbnx.azurewebsites.net>, free (Accessed: February 15, 2022).

10. Bayes Server. Available at: <https://www.bayesserver.com>, free. (Accessed: February 15, 2022).

11. Michiels M., Larrañaga P., Bielza C. BayeSuites: An open web framework for massive Bayesian networks focused on neuroscience. *Neurocomputing*, 2021, vol. 428, pp. 166–181.

12. Bayesian networks – BayeSuites. Available at: [https://neurosuites.com/morpho/ml\\_bayesian\\_networks](https://neurosuites.com/morpho/ml_bayesian_networks), free (Accessed: February 16, 2022).

13. Robinson I., Webber J., Eifrem E. *Graph Databases*. O'Reilly Media, 2013, 178 p.

14. Neo4j Graph Database. Available at: <https://neo4j.com/product/neo4j-graph-database/>, free (Accessed: February 15, 2022).

15. Structured Bayesian network and probabilities file. Available at: [https://drive.google.com/file/d/1ez6L5EyBUUpW8FTv\\_n3XD9ziwPMfXXAu/view](https://drive.google.com/file/d/1ez6L5EyBUUpW8FTv_n3XD9ziwPMfXXAu/view), free. (Accessed: May 16, 2021).

16. Zmееv D.O. *Prototip sistemy podderzhki prinjatija reshenij dlja upravlenija proektami na osnove standartov OMG Essence i bajesovskih setej* [Decision support system prototype for project management based on OMG Essence Standard and Bayesian networks. Cand. Diss.]. Tomsk, 2022. Available at: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/koha:000894552>, free (Accessed: July 5, 2022) (in Russ.).

**Denis O. Zmееv**

Assistant, Department of Software Engineering,  
National Research Tomsk State University (NR TSU)  
36, Lenin pr., Bldg. 2, Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 52-97-93  
Email: denis.zmееv@accounts.tsu.ru

**Oleg A. Zmееv**

Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, NR TSU  
36, Lenin pr., Bldg. 2, Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 52-97-93  
Email: ozmееv@gmail.com

**Lidiya S. Ivanova**

Assistant,  
Department of Software Engineering, NR TSU  
36, Lenin pr., Bldg. 2, Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 52-97-93  
Email: lidiya.ivanova@persona.tsu.ru

**Valery I. Freyдин**

Student,  
Higher IT-School, NR TSU  
36, Lenin pr., Bldg. 2, Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 52-97-93  
Email: www.carat@list.ru

УДК 004.42:352

А.А. Захарова, Н.В. Мезюха

## Информационная система сбора и анализа требований рынка труда для профессиональной подготовки и трудоустройства населения моногорода

Рассмотрена одна из проблем формирования и развития системы опережающей подготовки моногорода. В моногородах, находящихся в сложных социально-экономических условиях (в том числе в связи с проблемами на градообразующих предприятиях), возникает существенный количественный и качественный дисбаланс требований рынка труда и существующей профессионально-квалификационной структуры и численности трудоспособного населения. Соответственно, ориентация учебных заведений моногорода только на внутренний рынок труда не решит проблему трудоустройства. Рассматривается возможность анализа требований, внешних для моногорода рынков труда для трудоустройства населения в формате удаленной или вахтовой работы. Разработана автоматизированная система, осуществляющая сбор и анализ информации из существующих в сети Интернет баз вакансий (в частности, с портала hh.ru) с учетом заданных ограничений по формам трудоустройства. Разработанная система предоставляет аналитическую информацию по востребованным профессиям, востребованным компетенциям в вакансиях, а также востребованным компетенциям в профессиях. Эта информация может служить для обоснования учебными заведениями направлений и содержания образовательных программ.

**Ключевые слова:** моногород, опережающая подготовка кадров, рынок труда, информационная система, профессия, компетенция, микросервис.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-57-62

На сегодняшний день в РФ статус моногорода имеет более 300 поселений. Особенность моногородов состоит в том, что значительная часть экономики моногородов находится в зависимости от одного градообразующего предприятия. Поэтому ухудшение экономического положения такого предприятия приводит к серьезным проблемам в социально-экономической ситуации моногорода. В зависимости от сложившихся условий в моногороде могут использоваться различные пути его развития – от ликвидации до существенной диверсификации экономики города с помощью государственных мер поддержки [1].

В любом случае необходимо решать вопросы трудоустройства населения города, что обуславливает необходимость соответствия профессионально-квалификационной структуры населения города потребностям его рынка труда (текущего и прогнозного). С другой стороны, для моногорода важно сохранение численности населения, предотвращение оттока населения в связи с более выгодными условиями трудоустройства в других регионах и поселениях. Решение этих проблем связано с формированием и развитием системы опережающей подготовки кадров моногорода (СОПКМ) [3].

Исследователями отмечается, что формирование и развитие СОПКМ должны осуществляться в тесном взаимодействии заинтересованных в подготовке кадров субъектов: учебных заведения, работодатели, население города, администрация [4–6]. Таким образом, актуальной проблемой является создание среды сетевого взаимодействия субъектов СОПКМ, обеспечивающей их информацией для принятия решений. Отметим, что частично эта проблема решается путем разработки автоматизированных систем анализа и прогнозирования рынка труда на государственном и региональном уровне [7–9].

Но подобные разработки направлены на макро- и мезоуровень, не учитывают особенностей развития в моногородах, не опираются на учет интересов всех субъектов СОПКМ.

В [10] представлена проблема разработки комплексной методологической базы и программной среды, в которой обеспечиваются сетевое взаимодействие учебных заведений, работодателей, администрации моногорода, населения (индивидуумов), а также поддержка процессов принятия решений в соответствии с их задачами и требованиями. Сформирована система критериев и информационных потребностей принятия решения в СОПКМ, которые обусловили функциональные требования к информационной системе опережающей подготовки кадров моногорода (ИСОПКМ). Разработана программа ЭВМ – прототип ИСОПКМ. Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- анкетирование работодателей о текущих и прогнозных вакансиях, упраздняемых должностях, учет образовательных программ учебных заведений, учет информации о резидентах территории опережающего развития и их вакансиях;
- учет предпочтений индивидуумов (населения) при выборе вакансий для трудоустройства;
- анализ и прогнозирование потребностей рынка труда;
- анализ соответствия образовательных программ потребностям развития моногорода.

В программе реализовано несколько универсальных моделей принятия решений [11], которые могут применяться для анализа, оценки альтернатив и контроля достижения целей любого из субъектов СОПКМ.

Исследования, проведенные с помощью данного программного обеспечения в моногороде Юрга,

показали существенный дисбаланс между потребностями рынка труда и образовательными программами учебных заведений. Одним из решений этой проблемы является ориентация СОПКМ не только на внутренние потребности рынка труда моногорода, но и на внешние рынки труда других регионов и поселений. В целях сохранения населения города и предотвращения трудовой миграции особое внимание должно быть уделено таким формам трудоустройства, как вахтовый метод и удаленная работа.

Для проведения подобного анализа целесообразно воспользоваться существующими банками данных о вакансиях работодателей, представленных различными агрегаторами в сети Интернет. При этом следует учесть, что требования к компетенциям по вакансии формулируются работодателем в других терминах, отличных от компетенций в образовательных программах [12]. Анализ наиболее востребованных компетенций на рынке труда даст возможность учебным заведениям включить их в содержание образовательных программ, а следовательно, обеспечить дополнительные возможности трудоустройства населения СОПКМ.

В связи с этим актуальна разработка автоматизированной системы, которая позволяет проанализировать требования внешнего для моногорода рынка труда по различным формам трудоустройства, в разрезе профессий и компетенций. Основными функциями системы будут являться сбор данных из внешних источников и их анализ с целью получения информации о востребованных профессиях и компетенциях в целях совершенствования СОПК моногорода.

#### Архитектура разрабатываемой системы

Для реализации системы была выбрана микросервисная архитектура системы. Она позволяет выстроить взаимодействие между модулями системы, написанными на разных языках программирования, также позволяет проводить изменения в одном модуле без внесения изменения в другие.

Для разработки, развертывания и управления микросервисов применяется Docker. Данный инструмент позволяет запаковывать приложения в контейнеры. Контейнеры – это стандартизированные исполняемые компоненты, объединяющие исходный код приложения с библиотеками операционной системы и зависимостями, необходимыми для запуска этого кода в любой среде [13].

В разработанной системе были созданы микросервисы «Парсер», «Анализатор» и базы данных вакансий (рис. 1). Все взаимодействие микросервисов происходит с помощью HTTP-запросов.

#### Микросервис базы данных вакансий

Для того чтобы хранить вакансии, полученные микросервисом «Парсер», необходимо разработать базу данных. При разработке была выбрана MongoDB. Это программа управления базами данных NoSQL с открытым исходным кодом. NoSQL используется как альтернатива традиционным реляционным базам данных [14].



Рис. 1. Схема микросервисной архитектуры информационной системы

Данная база данных была выбрана потому, что она позволяет без проблем изменять свою структуру, что необходимо для дальнейшей разработки получения данных с разных агрегаторов вакансий.

Разработанная база данных в виде ER-диаграммы в нотации Мартина представлена на рис. 2.

Для просмотра содержимого базы данных используется программа MongoDB Compass.



Рис. 2. База данных вакансий

#### Микросервис «Парсер»

Данный микросервис отвечает за сбор данных и реализацию соответствующего алгоритма (рис. 3). Он реализован при помощи следующих инструментов: Java – объектно-ориентированный язык программирования; Spring boot – инструмент, ускоряющий и упрощающий разработку веб-приложений и микросервисов [15]; Spring data – дополнительный механизм для взаимодействия с сущностями базы данных, организации их в репозитории, извлечения данных, изменения; Jackson – это высокопроизводительный JSON-процессор для Java; IntelliJ IDEA – это среда разработки для языков программирования, запускающихся на JVM (Java Virtual Machine).

Чтобы проводить анализ востребованных профессий и компетенций на рынке труда, необходимо собрать большое количество вакансий. Для решения данной проблемы был разработан метод сбора дан-

ных (см. рис. 3). Представленный алгоритм является основным в микросервисе.

В качестве внешнего источника для парсинга выбран сервис HeadHunter, как наиболее популярный и содержащий большую базу вакансий. В результате запросов к HeadHunter API [16] в базу данных было сохранено 12493 вакансии для тестирования системы. Отбирались вакансии с формами трудоустройства – вахтовый метод и удаленная работа.



Рис. 3. Алгоритм метода сбора данных

### Микросервис «Анализатор»

Этот микросервис отвечает за анализ данных. С его помощью получают списки востребованных профессий, компетенций в профессиях и компетенций в вакансиях. Он реализован с помощью тех же инструментов, что и микросервис «Парсер».

В ходе анализа полученных данных было выяснено, что вакансии не всегда включают профессии. Поэтому было принято решение разрабатывать методы анализа не только для конкретных профессий, но и для всех вакансий.

Также при анализе полученных данных выяснилось, что профессии и компетенции никак не связаны в получаемых данных от HeadHunter API. Поэтому для начала необходимо к профессиям прикрепить список компетенций (рис. 4).

Чтобы реализовать анализ компетенций, необходимо сначала для каждой компетенции подсчитать количество её вхождения в профессии и в вакансии. Для этого были разработаны методы для получения востребованных компетенций в вакансиях и в профессиях. Они берут все компетенции, сортируют их в порядке убывания по количеству их вхождения в вакансии или в профессии и возвращают данный массив.

Метод для получения востребованных компетенций в вакансиях берет все компетенции, сортирует их в порядке убывания по количеству их вхождения в вакансии и возвращает данный массив. Алго-

ритм получения востребованных компетенций во всех профессиях работает аналогично предыдущему алгоритму, он также выводит компетенции в убывающем порядке по их вхождению, но уже по профессиям.

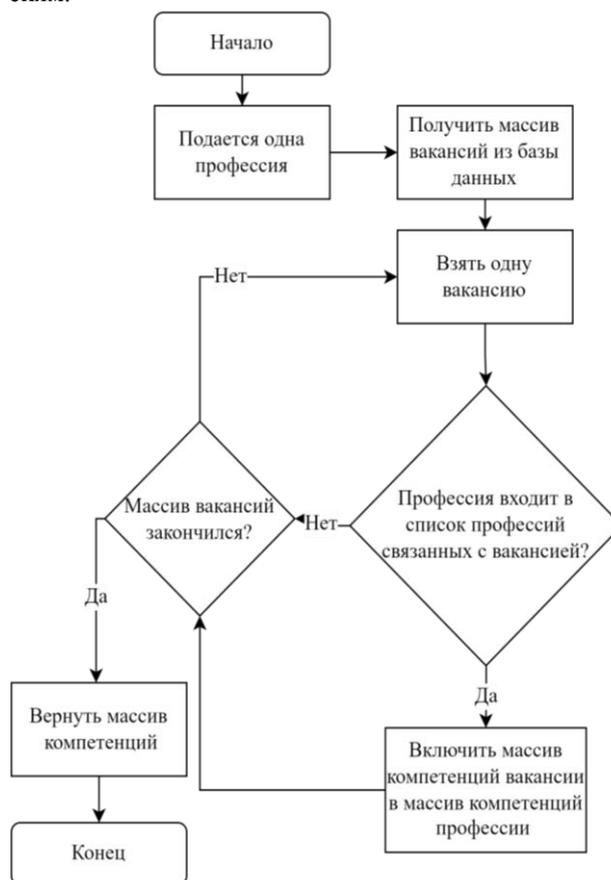


Рис. 4. Алгоритм метода получения компетенций для профессий

Для получения самых востребованных компетенций в конкретной профессии был разработан соответствующий метод (рис. 5).

Также был реализован метод для получения востребованных профессий в вакансиях. Он выводит профессии в убывающем порядке по количеству вхождения их в вакансии. Алгоритм данного метода такой же, как и у метода получения востребованных компетенций в вакансиях, только берется массив профессий, а выводится отсортированный по убыванию массив профессий.

Чтобы реализовать предыдущий метод, был разработан еще один метод, который подсчитывает количество вхождений профессий в вакансии. Данный метод аналогичен методу подсчета количества вхождения компетенции в вакансии, только вместо компетенций подставляются профессии.

### Результаты апробации системы

С помощью разработанного программного обеспечения было осуществлено несколько запросов. Так, например, результатом обращения к методу получения самых востребованных компетенций в профессии «Инженер по эксплуатации» является следующий массив: английский язык; ориентация на

результат; работа в условиях многозадачности; управление персоналом; техническое обслуживание; точность и внимательность к деталям; оформление документации; ведение отчетности; навыки составления отчетности; высшее образование. Результатом обращения к методу получения самых востребован-

ных компетенций во всех вакансиях является следующий список: английский язык; AutoCAD; строительство; Git; ориентация на результат; работа в условиях многозадачности; JavaScript; управление проектами; обучение и развитие; управление персоналом.

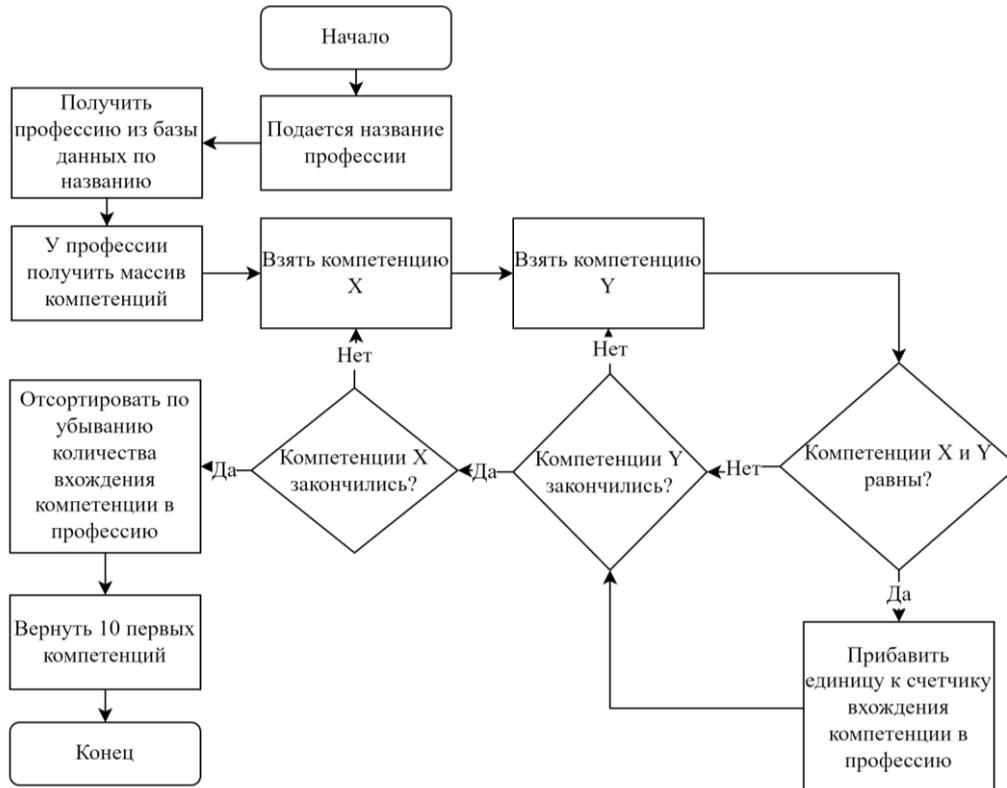


Рис. 5. Алгоритм получения десяти самых востребованных компетенций в конкретной профессии

Результатом обращения к методу получения самых востребованных компетенций во всех профессиях является следующий список: работа в условиях многозадачности; управление персоналом; ответственность и пунктуальность; точность и внимательность к деталям; оформление документации; материальная ответственность; навыки составления отчетности; спокойствие; умение работать в условиях многозадачности; работа с людьми.

Результатом обращения к методу получения самых востребованных профессий является следующий список: машинист; токарь, фрезеровщик, шлифовщик; упаковщик, комплектовщик; сварщик; слесарь; прораб, мастер СМР; монтажник; автослесарь, автомеханик; начальник смены, мастер участка; уборщица, уборщик.

Весь анализ данных проводился для вакансий на удаленной и вахтовой работе. Также, исходя из того, что списки востребованных компетенций в вакансиях и в профессиях сильно отличаются, можно сделать вывод, что у многих вакансий не представлена профессия.

### Заключение

Получены следующие основные результаты, имеющие значение для развития цифровой под-

держки системы сбора и анализа требований рынка труда для трудоустройства населения моногорода:

- разработаны методы для сбора и анализа требований рынка труда для трудоустройства населения моногорода;

- предложена гибкая архитектура системы с возможностью в дальнейшем добавить новые подпрограммы к ней без изменения работы уже разработанных модулей;

- спроектирована и реализована база данных, имеющая возможность изменения для дальнейших изменений без потери работоспособности всей системы;

- разработан микросервис для получения данных с других веб-ресурсов. В результате получено 12493 вакансии;

- разработан микросервис для анализа вакансий.

Разработанные методы для сбора и анализа требований рынка труда для трудоустройства населения моногорода позволяют осуществлять сбор и анализ информации о вакансиях на внешнем для моногорода рынке труда. Разработанная система предоставляет аналитическую информацию по востребованным профессиям, востребованным компетенциям в вакансиях, а также востребованным компетенциям в профессиях. Эта информация может служить для

обоснования учебными заведениями направлений и содержания образовательных программ, готовить востребованных специалистов для внешнего рынка труда моногорода. Выбранная форма трудоустройства (удаленная работа и вахтовый метод) позволяет снижать отток населения моногорода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-013-00486А.

### Литература

1. Шаститко А.Е. Моногорода России: возможные варианты развития / А.Е. Шаститко, А.Ф. Фатихова // Государственное управление. Электронный вестник. – 2019. – № 76. – С. 109–135.
2. Иванова М.В. Тенденции и особенности развития моногородов в России и повышение их конкурентоспособности // Вестник Кемеровского гос. ун-та. – Сер.: Политические, социологические и экономические науки. – 2018. – № 1. – С. 86–91.
3. Гильманов А.З. Система профессиональной подготовки кадров монопрофильного города: социологический анализ / А.З. Гильманов, Л.А. Давлетшина. – Казань: Познание, 2013. – 124 с.
4. Lizunkov V.G Effectiveness criteria for interaction between the participants of the educational production cluster within PDA / V.G Lizunkov, M.V. Morozova, A.A. Zakharova // International Journal of Emerging Technologies in Learning. – 2021. – Vol. 16, No 8. – P. 252–260
5. Franco M. University-industry cooperation: researchers' motivations and interaction channels / M. Franco, H. Haase // Journal of Engineering and Technology Management. – 2015. – Vol. 36. – P. 41–51. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2015.05.002>.
6. Mulkeen J. Degree and Higher Level Apprenticeships: an empirical investigation of stakeholder perceptions of challenges and opportunities / J. Mulkeen, H.A. Abdou, J.A. Leigh // Studies in higher education. – 2019. – Vol. 44, No. 2. – P. 333–346.
7. Mahesh M. Labour market information system / M. Mahesh, S. Naitik // International journal of Application or Innovation in Engineering and Management (IJAIEM). – 2014. – Vol. 3, iss. 3. – P. 534–541.
8. Ванкевич Е.В. Информационно-аналитическая система рынка труда и прогнозирования потребности в кадрах: содержание и направления формирования в Республике Беларусь / Е.В. Ванкевич, Э. Кастел-Бранко // Белорус. экономический журнал. – 2017. – № 2 (79). – С. 73–92.
9. Система прогнозирования потребности в трудовых ресурсах [Электронный ресурс] // IBS. – Режим доступа: <https://ibs.ru/projects/reu-im-g-v-plekhanova-sistema-prognirovaniya-potrebnosti-v-trudovykh-resursakh/>, свободный (дата обращения: 30.06.2022).
10. Захарова А.А. Информационная система опережающей подготовки кадров моногорода: концепция, функции и состав модулей / А.А. Захарова, Л.Ю. Захаров // Доклады ТУСУР. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 62–68. – DOI: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-62-68.
11. Zakharova A.A. Formalization of Typical Problems of Decision Making on the Basis of Expert Knowledge in the Priority Personnel Training System for Monotowns / A.A. Zakharova, L.Yu. Zakharov // Advances in Economics, Business and Management Research. – 2020. – Vol. 156. – P. 77–81.
12. Cedefop. Carrying out tracer studies: guide to anticipating and matching skills and jobs. – Vol. 6 [Электронный ресурс] / Cedefop, European Training Foundation, H. Schomburg. – Publications Office of the European Union, 2016. – Режим доступа: <https://data.europa.eu/doi/10.2816/938667>, свободный (дата обращения: 30.06.2022).
13. Use containers to Build, Share and Run your applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.docker.com/resources/what-container/>, свободный (дата обращения: 05.03.2022).
14. MongoDB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.techtarget.com/searchdatamanagement/definition/MongoDB>, свободный (дата обращения: 20.04.2022).
15. Java Spring Boot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.ibm.com/cloud/learn/java-spring-boot#:~:text=Java%20Spring%20Boot%20\(Spring%20Boot,ability%20to%20create%20standalone%20applications](https://www.ibm.com/cloud/learn/java-spring-boot#:~:text=Java%20Spring%20Boot%20(Spring%20Boot,ability%20to%20create%20standalone%20applications), свободный (дата обращения: 15.04.2022).
16. HeadHunter API [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dev.hh.ru/>, свободный (дата обращения: 10.04.2022).

### Захарова Александра Александровна

Д-р техн. наук, доцент, проф. каф. автоматизированных систем управления (АСУ)

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Вершинина ул., 74, г. Томск, Россия, 634045

ORCID: 0000-0002-2379-8698

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36

Эл. почта: zacharova@mail.ru

### Мезюха Николай Вадимович

Магистрант каф. АСУ ТУСУРа

Вершинина ул., 74, г. Томск, Россия, 634045

Тел.: +7-999-495-40-25

Эл. почта: nikmezyuha@gmail.com

Zakharova A.A., Meziukha N.V.

### Information system of collection and analysis the requirements of the labor market to employ the population of a monotown

The article considers one of the problems of formation and development of the system of advanced training of personnel for a monotown. In monotowns that are in difficult socio-economic conditions (including the ones that are caused by problems related to the city-forming enterprises), there is a significant quantitative and qualitative imbalance between the requirements of the labor market and the existing professional and qualification structure and the size of the able-bodied population. Accordingly, the orientation of educational institutions of a single-industry town only to the domestic labor market will not solve the problem of employment. In this regard, the article considers the possibility of analyzing the requirements of external labor markets for a single-industry town for employment of the population in the format of remote or rotational work. An automated system has been developed that collects and analyzes information from the databases of vacancies existing on the Internet (in particular, from the portal hh.ru), taking into account the specified restrictions on the employment forms. The developed system provides analytics on in-demand professions, in-demand competencies in vacancies, as well as in-demand competencies in professions. This information can serve to substantiate the directions

and content of educational programs for educational institutions.

**Keywords:** monotown, advanced training, labor market, information system, profession, competence, microservice.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-57-62

### References

1. Shastitko A.E., Fatihova A.F. *Monogoroda Rossii: vozmozhnye varianty razvitiya* [Monotowns of Russia: Possible Development Options]. *Gosudarstvennoe Upravlenie. Elektronnyj Vestnik*, 2019, no. 476 pp. 109–135 (in Russ.).

2. Ivanova M.V. [Tendencies and features of development of Russian monotowns and their competitive recovery]. *Vestnik Kemerovskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Politicheskie, Sociologicheskie i Ekonomicheskie Nauki*, 2018, no. 1, pp. 86–91 (in Russ.).

3. Gilmanov A.Z., Davletshina L.A. *Sistema professional'noj podgotovki kadrov monopofil'nogo goroda: sociologicheskij analiz* [The system of professional training of personnel in a single-industry city: a sociological analysis]. Kazan', Izdatel'stvo «Poznanie», 2013, 124 p. (in Russ.).

4. Lizunkov V.G. Morozova M.V., Zakharova A.A. Effectiveness criteria for interaction between the participants of the educational production cluster within PDA. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 2021, vol. 16, no 8, pp. 252–260.

5. Franco M., Haase H. University-industry cooperation: researchers' motivations and interaction channels. *Journal of Engineering and Technology Management*, 2015, vol. 36, pp. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2015.05.002>.

6. Mulkeen J., Abdou H.A., Leigh J.A. Degree and Higher Level Apprenticeships: an empirical investigation of stakeholder perceptions of challenges and opportunities. *Studies in higher education*, 2019, vol. 44, no 2, pp. 333–346.

7. Mahesh M. Naitik S. Labour market information system. *International journal of Application or Innovation in Engineering and Management (IJAIEM)*, 2014, vol. 3, iss. 3, pp. 534–541.

8. Vankevich A., Castel-Branco E. [Labour market information system and skills anticipation (LMIS): content and directions of formation in the Republic of Belarus]. *Belarusian Economic Journal*, 2017, no. 2 (79), pp. 73–92.

9. Sistema prognozirovaniya potrebnosti v trudovykh resursakh [The system for forecasting the need for labor resources]. IBS. Available at: <https://ibs.ru/projects/reu-im-g-v-plekhanova-sistema-prognozirovaniya-potrebnosti-v-trudovykh-resursakh/>, free (Accessed: June 30, 2022) (in Russ.).

10. Zakharova A.A., Zakharov L.Yu. [Information system to support an advanced training of personnel for a monotown: concept, functions and composition of modules] // *Proceedings of TUSUR University*, 2021, vol. 3, no. 3, pp. 62–68 (in Russ.). DOI 10.21293/1818-0442-2021-24-3-62-68.

11. Zakharova A.A., Zakharov L.Yu. Formalization of Typical Problems of Decision Making on the Basis of Expert Knowledge in the Priority Personnel Training System for Monotowns. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 2020, vol. 156, pp. 77–81.

12. Cedefop, European Training Foundation, Schomburg H. *Carrying out tracer studies: guide to anticipating and matching skills and jobs. Volume 6*. Publications Office of the European Union, 2016. Available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2816/938667>, free (Accessed: June 30, 2022).

13. Use containers to Build, Share and Run your applications. Available at: <https://www.docker.com/resources/what-container/>, free (Accessed: June 05, 2022).

14. MongoDB, free Available at: <https://www.techtarget.com/searchdatamanagement/definition/MongoDB>, free (Accessed: June 05, 2022).

15. Java Spring Boot Available at: [https://www.ibm.com/cloud/learn/java-spring-boot#:~:text=Java%20Spring%20Boot%20\(Spring%20Boot,ability%20to%20create%20standalone%20applications](https://www.ibm.com/cloud/learn/java-spring-boot#:~:text=Java%20Spring%20Boot%20(Spring%20Boot,ability%20to%20create%20standalone%20applications), free (Accessed: June 05, 2022).

16. HeadHunter API. Available at: <https://dev.hh.ru/>, free (Accessed: June 05, 2022).

---

### Alexandra A. Zakharova

Doctor of Science in Engineering, Professor,  
Department of Automated Control Systems (ACS),  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR)  
74, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045  
ORCID: 0000-0002-2379-8698  
Phone: +7 (382-2) 70-15-36  
Email: zacharovaa@mail.ru

### Nikolay V. Meziukha

Master Student, Department ACS TUSUR  
74, Vershinina st, Tomsk, Russia, 634045  
Phone: +7-999-495-40-25  
Email: nikmezyuha@gmail.com

УДК 519.863

Е.Б. Грибанова, Р.Р. Мустакимов

## Разработка алгоритма решения обратной задачи формирования прибыли при ограничении целочисленности

Представлен алгоритм решения обратной задачи формирования прибыли, отличающийся от существующих учётом ограничения на целочисленность характеристик. На основе данного алгоритма реализовано веб-приложение для поддержки принятия решений по достижению целевых показателей организации.

**Ключевые слова:** обратная задача, прибыль, целочисленное программирование, обратные вычисления, веб-приложение.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-63-68

Прибыль является одним из основных показателей деятельности экономического субъекта. При анализе в условиях риска и неопределённости данный показатель даёт возможность определить эффективность деятельности хозяйствующего субъекта. Предприятия заинтересованы в получении и увеличении прибыли от поставки товаров и услуг или осуществлении другой деятельности. Одним из важнейших механизмов для достижения этих целей является составление планов продаж и переоценка товаров и услуг, поставляемых предприятием.

Для лица, принимающего решения о формировании плана продаж и ценообразовании, ключевое значение имеют данные продаж за предыдущие периоды и результаты их анализа. Решение обратной задачи предоставляет информацию о том, как необходимо изменить исходные данные, чтобы получить ожидаемый результат. Таким образом, решение обратных задач является важным инструментом поддержки принятия решений.

Обратная задача формирования прибыли предприятия направлена на получение информации о том, каким образом необходимо изменить себестоимость, цену и количество продаваемых товаров или предоставляемых услуг, чтобы получить ожидаемую прибыль в конце периода. При решении необходимо учитывать ограничения предметной области. В частности, таким ограничением является целочисленность некоторых характеристик. Например, позиции блюд в меню ресторана являются целочисленными значениями.

Современные системы поддержки принятия решений (СППР) имеют функционал, позволяющий составлять планы продаж и формировать цены на продукты и услуги на основе данных предыдущих периодов. Однако с учётом того, что зачастую эти СППР имеют колоссальное количество функций и ориентированы на большие предприятия и корпорации, стоимость таких систем является большим препятствием для использования их в управлении небольшими предприятиями.

Для реализации доступного для небольших предприятий решения по предоставлению информации, которая поможет при формировании цен и плана продаж, одним из оптимальных вариантов явля-

ется реализация веб-сайта с соответствующим функционалом. Такое решение позволит повысить качество анализа данных по продажам за предыдущий период, а также косвенно снизить издержки по созданию и поддержанию информационной инфраструктуры для предприятий.

В литературе рассматривается решение обратных задач с помощью различных подходов. Так, в статье [1] приводится постановка и решение обратных задач при минимизации суммы модулей аргументов для отбора изменяемых характеристик. Работа [2] посвящена решению обратной задачи при минимизации суммы квадратов изменений аргументов. Для решения полученной задачи рассмотрены методы нелинейного программирования (множителей Лагранжа, замены переменных). Полученное таким образом решение характеризуется минимальным изменением характеристик.

Применение обратных вычислений в сфере экономики и принятия решений с использованием экспертной информации описано в работах Б.Е. Одинцова [3], О.В. Виштак [4], Е.А. Барминой [5], А.В. Мартыановой [6], С.Л. Блюмина [7], а также в статьях [8, 9]. В литературе рассматривается решение обратных задач с учетом ограничений на величины показателей в виде нижней и верхней границы.

Так, в [10] описана итерационная процедура, которая заключается в последовательном изменении функционала и определении величин изменений аргументов, что позволяет получить результат с учетом заданных ограничений.

В работе [11] приводится стохастический алгоритм, основанный на выборе аргумента для изменения с помощью моделирования полной группы несовместных событий и последующей корректировки его значения в случае выхода значения за заданные границы. Однако в представленных в литературе исследованиях не рассматриваются поиск решения с учётом целочисленности показателей.

### Постановка задачи и цели исследования

Целью данной работы является разработка алгоритма решения обратной задачи формирования прибыли предприятия с учётом целочисленности некоторых характеристик.

Задачи, которые позволят достичь поставленной цели:

- 1) разработать алгоритм решения обратной задачи формирования прибыли на базе обратных вычислений;
- 2) модифицировать алгоритм с учётом ограничений на целочисленность некоторых характеристик;
- 3) выполнить тестирование работы алгоритма;
- 4) реализовать веб-приложение.

Прямая задача формирования прибыли заключается в расчёте итогов деятельности предприятия за период. При наличии сформированных данных о цене, себестоимости и количестве реализованного товара расчёт прибыли производится по формуле

$$\Pi = K \cdot (\Pi - C), \quad (1)$$

где  $K$  – объем продаж;  $\Pi$  – цена;  $C$  – себестоимость.

В случае многономенклатурной задачи суммарная прибыль вычисляется на основе величин прибыли  $\Pi_i$  по каждому  $i$ -му наименованию

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i. \quad (2)$$

Полученная задача представлена в виде дерева показателей на рис. 1. Здесь  $\alpha_i$  – коэффициенты относительной важности прибыли по  $i$ -му наименованию,  $\beta_i$ ,  $\eta_i$ ,  $\gamma_i$  – коэффициенты относительной важности объема продаж, себестоимости, цены  $i$ -го наименования соответственно.

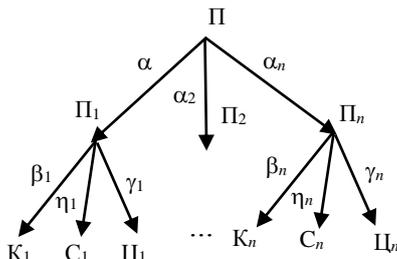


Рис. 1. Дерево показателей

Использование приведённых формул позволяет рассчитать прибыль для каждого товара. Но для лица, принимающего решения, при формировании планов продаж и ценообразовании интересен вопрос «Как увеличить прибыль?». Данный вопрос можно конкретизировать и сформулировать следующим образом: «Каким образом необходимо изменить значения параметров цены, себестоимости и количества продаваемого товара, чтобы прибыль изменилась на  $N\%$  или приняла значение  $\Pi^*$ ?». Это и есть обратная задача формирования прибыли предприятия.

Метод обратных вычислений для решения обратной задачи подразумевает вычисление значений приращений характеристик прямой функции для её значений в конкретной точке с помощью дополнительной информации, которая может быть получена от лица, принимающего решения. Этой дополнительной информацией могут быть коэффициенты относительной важности (КОВ) аргументов – отно-

сительные оценки показателей от экспертов или лица, принимающего решения.

Задача формирования общей прибыли имеет следующий вид:

$$\Pi + \Delta\Pi = \sum_{i=1}^n (\Pi_i + \Delta\Pi_i(\alpha_i)),$$

где  $\Delta\Pi$  – общее изменение прибыли,  $\Delta\Pi_i(\alpha_i)$  – приращение прибыли по одному товару,  $\alpha_i$  – коэффициент относительной важности конкретного товара.

Определение изменения при аддитивной модели может быть выполнено по формуле

$$\Delta\Pi_i = \alpha_i \cdot \Delta\Pi. \quad (3)$$

В этом случае изменения определяются таким образом, чтобы сумма абсолютных значений изменений была минимальна.

Решение обратной подзадачи второго уровня определяется с помощью решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \Pi + \Delta\Pi = (K + \Delta K(\beta)) \cdot ((\Pi + \Delta\Pi(\gamma)) - (C + \Delta C(\eta))), \\ \frac{\Delta\Pi}{\Delta K} = \frac{\gamma}{\beta}, \\ \frac{\Delta\Pi}{\Delta C} = \frac{\eta}{\gamma}. \end{cases}$$

Неизвестными в системе являются величины приращений:  $\Delta\Pi$ ,  $\Delta K$ ,  $\Delta C$ . Выразив значения, получим уравнение

$$\Pi + \Delta\Pi = \left( K + \Delta C \frac{\beta}{\gamma} \right) \cdot \left( (\Pi + \Delta\Pi) - \left( C + \Delta C \frac{\eta}{\gamma} \right) \right).$$

В результате решение системы сводится к поиску корня уравнения с одним неизвестным –  $\Delta\Pi$ . Для решения задачи был использован метод Ньютона.

Далее необходимо сложить исходные значения цены, себестоимости и количества товара с соответствующими значениями приращений и вычислить прибыль с помощью формулы (1).

Таким образом, общий алгоритм решения задачи формирования суммарной прибыли будет включать следующие шаги:

Шаг 1. Рассчитать общую прибыль, полученную с продажи товаров, по формулам (1), (2).

Шаг 2. Получить значение целевой прибыли, коэффициенты относительной важности и направления изменения показателей.

Шаг 3. Рассчитать изменение прибыли для каждого товара с помощью формулы (3).

Шаг 4. Определить значения изменения количества, цены и себестоимости для достижения целевой прибыли по каждому товару.

Шаг 5. Прибавить полученные значения изменений к исходным значениям.

Шаг 6. Вычислить полученное значение прибыли с учётом изменений по формулам (1), (2).

#### Метод решения и результаты

В рассматриваемой задаче с использованием данных ресторана быстрого питания используются

данные по продажам порций еды. Порции еды в данном контексте выражаются в виде позиций в меню, где каждая позиция может быть продана только в целом количестве. Однако результатом использования описанного выше алгоритма будут дробные значения.

При первичном анализе были предложены следующие решения данной проблемы:

- 1) простое округление по правилам математики;
- 2) округление всех значений в меньшую или большую сторону;
- 3) формирование возможности для лица, принимающего решения, самостоятельно решить вопрос с количеством продаваемых товаров;
- 4) округление величин таким образом, чтобы получить значение прибыли, наиболее близкое к заданному.

Недостатки первого и второго предложения очевидны: лицо, принимающее решение, получит некорректные данные по остальным параметрам и будет введено в заблуждение, что может повлечь за собой принятие решений, которые могут негативно сказаться на экономических результатах компании. В третьем варианте на эксперта ложится дополнительная задача по определению величин, что может потребовать значительных затрат временных ресурсов.

Для реализации четвертого варианта необходимо применение методов целочисленного программирования. Далее осуществляется внедрение одного из методов целочисленного программирования в существующий алгоритм решения задачи формирования прибыли.

Таким образом, алгоритм решения обратной задачи формирования прибыли будет дополнен следующими шагами:

Шаг 4.1. Округлить значения изменения объема продаж.

Шаг 4.2. Пересчитать значения приращений цены и себестоимости по каждому товару.

Шаг 4.3. Оптимизировать ранее вычисленные значения изменения цены и себестоимости с учётом целочисленности количества.

Шаг 4.4. Проверить возможностьдостижимости полученных значений.

Существует несколько методов решения задач, в которых искомые переменные имеют условие целочисленности [12]:

- метод Гомори;
- метод ветвей и границ;
- метод Монте-Карло;
- венгерский метод и др.

Реализация графического метода в виде компьютерного алгоритма представляется задачей, включающей в себя множество подзадач, не имеющих отношения к цели: составление алгоритма составления графиков и чтения информации с них.

Реализация метода ветвей и границ требует множественного и сложного ветвления условий, которое, во-первых, затрудняет реализацию, а во-вторых, может существенно увеличить время выполнения программы и требования к оборудованию.

Метод Монте-Карло, основанный на генерировании случайных чисел, позволяет найти решение задачи за ограниченное время, когда полный перебор требует значительных временных ресурсов, и часто используется для решения как полностью целочисленных задач, так и смешанных [13–15]. Данный метод и будет использован в работе, поскольку число вариантов для каждого вида продукции может быть достаточно велико.

Задача целочисленного программирования может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} &|\tilde{\Pi}_i^* - \Pi_i^*| \rightarrow \min, \\ &\tilde{\Pi}_i^*(K_i^*) = K_i^* \cdot (\Pi_i^* - C_i^*), \\ &K_i^* \in z, \end{aligned}$$

где  $\Pi_i^*$  – целевая прибыль по  $i$ -му товару, вычисленная с помощью формулы (3);  $\tilde{\Pi}_i^*$  – целевая прибыль по  $i$ -му товару, вычисленная с учётом целочисленности;  $K_i^*$  – искомое целочисленное значение объема продаж  $i$ ;  $\Pi_i^*$  – вычисленная путем решения обратной задачи цена товара  $i$ ;  $C_i^*$  – вычисленная путем решения обратной задачи себестоимость товара  $i$ .

Для решения задачи выполняется округление в большую и меньшую сторону и осуществляется выбор варианта, обеспечивающего наименьшее значение целевой функции.

С целью компенсации изменения рекомендуемого значения количества товара необходимо пересчитать значения приращения цены товара и себестоимости. Задача будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} &|\tilde{\Pi}_i^* - \Pi_i^*| \rightarrow \min, \\ &\tilde{\Pi}_i^*(\Delta\Pi_i^*) = K_i^* \cdot \left( \Pi_i^* + \Delta\Pi_i^* - \left( C_i^* + \Delta C_i^* \frac{\eta}{\gamma} \right) \right), \\ &K_i^* = \text{const}, \end{aligned}$$

где  $\Delta\Pi_i^*$  – компенсирующее целочисленность значения изменение цены товара;  $\Delta C_i^* \frac{\eta}{\gamma}$  – компенсирующее целочисленность значения изменение себестоимости товара, выраженное с помощью коэффициентов относительной важности цены и себестоимости, а также компенсирующего значения изменения цены.

С помощью разработанного алгоритма выполнено решение задачи формирования прибыли ресторана быстрого питания. Исходные данные представлены в табл. 1. Под номерами 1, 2 и 3 рассматриваются соответственно следующие наименования продукции: «Филадельфия», «Сяки-маки», «Филадельфия лайт». В данной задаче предполагается, что себестоимость остается без изменения, а происходит изменение цены и объема продаж. При этом на основе статистических данных была выявлена зависимость, согласно которой при снижении цены растет

объем продаж. Данная зависимость представляется в виде регрессионной, и доверительный интервал используется для проверки достижимости объема продаж при заданной цене.

Таблица 1

Номер продукции	Исходные данные		
	Себестоимость, руб.	Цена, руб.	Объем продаж, шт.
1	7,96	29	22
2	4,96	19	19
3	5,33	23	20

Коэффициенты важности цены, себестоимости, объема продаж представлены в табл. 2. При этом предполагается увеличение цены и объема продаж и уменьшение себестоимости.

Таблица 2

Номер продукции	Коэффициенты важности показателей		
	Себестоимость	Цена	Объем продаж
1	0	0,4	0,6
2	0	0,3	0,7
3	0	0,35	0,65

Целевая прибыль составляет 1500 руб., коэффициенты важности прибыли для первого, второго и третьего вида продукции составляют соответственно 0,4; 0,3 и 0,3 (в табл. 2 приведены коэффициенты относительной важности для себестоимости, цены и объема продаж по каждому виду продукции).

В табл. 3 приведено решение обратной задачи без учета целочисленности объема продаж.

Таблица 3

Номер продукции	Вычисленные значения		
	Отклонение от заданной прибыли, руб.	Цена, руб.	Объем продаж, шт.
1	121,89	25,81	26,78
2	162,95	16,05	25,88
3	74,49	19,55	26,41

В табл. 4 приведено решение с учетом целочисленности.

Таблица 4

Номер продукции	Исходные данные		
	Отклонение от заданной прибыли, руб.	Цена, руб.	Объем продаж, шт.
1	0	26,14	33
2	0	17,82	35
3	0,59	20,35	30

При этом были скорректированы коэффициенты относительной важности. Так, на рис. 2 представле-

ны полученные соотношения изменения показателей для первого вида продукции. Эвклидова метрика отклонения от заданных значений коэффициентов важности составляет 0,386.



Рис. 2. Соотношения изменения показателей

Для сравнения также был реализован алгоритм случайного поиска, в котором осуществляется случайным образом генерирование изменений аргументов и определяется вариант с минимальной целевой функцией. В качестве целевой функции рассматривается отклонение от заданного значения прибыли и коэффициентов относительной важности. Так, в результате 1 млн итераций было получено решение для второго вида продукции, при котором отклонение от заданного значения функции составило 3,25, а величина эвклидовой метрики отклонения от заданных значений коэффициентов важности составляет 0,408. На рис. 3 представлены результаты ставычислительных экспериментов, решение с помощью разработанного алгоритма отмечено черным цветом. Наилучшим решением является то, которое расположено ближе к началу координат. Полученное решение с помощью алгоритма является оптимальным, так как обеспечивает наименьшее отклонение от заданного значения прибыли и наименьшее значение эвклидовой метрики (по сравнению с решением с помощью алгоритма случайного поиска).

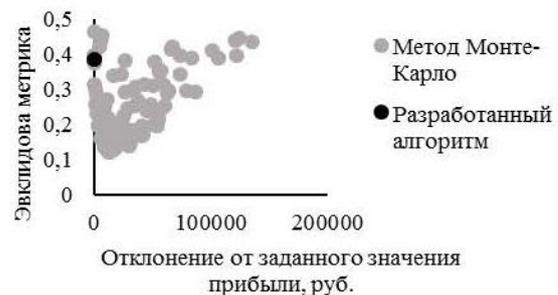


Рис. 3. Результаты моделирования

На основе алгоритма был реализован веб-сайт, который состоит из двух слоёв: серверного и клиентского. Серверный слой сайта содержит реализацию всех алгоритмов системы и реализуется на языке Java. Клиентская часть реализована на языке HTML с применением шаблонов из библиотеки Bootstrap.

### Заключение

Применение разработанного алгоритма, основанного на последовательном решении двухуровневой обратной задачи, позволяет определить величины показателей при ограничении на целочисленность. Результаты вычислительных экспериментов,

представленные в табл. 4 и на рис. 2, свидетельствуют о том, что полученное решение при целочисленном объеме продаж соответствует заданному значению прибыли и установленным коэффициентам относительной важности. Решение с помощью разработанного алгоритма является более оптимальным по сравнению с решением, полученным с помощью случайного поиска, в плане соответствия заданному значению прибыли и коэффициентам относительной важности.

#### Литература

1. Ahuja R.K. Inverse Optimization, Part1: Linear Programming and General Problem / R.K. Ahuja, J.B. Orlin. – Cambridge: MIT, 1998. – 35 p.
2. Ye N. Optimization Methods for Inverse Problems / N. Ye, F. Roosta-Khorasani, T. Cui // *MATRIX Annals*. – 2017. – Vol. 2. – P. 121–140.
3. Одинцов Б.Е. Обратные вычисления в формировании экономических решений. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 256 с.
4. Виштак О.В. Использование технологии обратных вычислений при мониторинге качества дополнительного образования в вузе / О.В. Виштак, И.А. Штырова // *Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та*. – 2014. – № 2. – С. 67–73.
5. Бармина Е.А. Мониторинг качества коммерческой организации. Структурирование показателей. Применение когнитивных карт / Е.А. Бармина, И.Ю. Квятковская // *Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та*. – 2010. – № 2. – С. 15–20.
6. Мартъянова А.В. Управление эффективностью банка на базе обратных вычислений // *Вестник магистратуры*. – 2015. – № 6. – С. 77–79.
7. Блюмин С.Л. Применение анализа конечных изменений и метода обратных вычислений в системах управления и поддержки принятия решений / С.Л. Блюмин, Г.С. Боровкова // *Проблемы управления*. – 2018. – № 6. – С. 29–34.
8. Грибанова Е.Б. Методы решения обратных задач экономического анализа // *Корпоративные финансы*. – 2016. – № 1. – С. 119–130.
9. Грибанова Е.Б. Методы решения обратных задач экономического анализа с помощью минимизации приращений аргументов // *Доклады ТУСУР*. – 2018. – № 2. – С. 95–99.
10. Одинцов Б.Е. Итерационный метод оптимизации управления предприятиями средствами обратных вычислений / Б.Е. Одинцов, А.Н. Романов // *Вестник Финансового ун-та*. – 2014. – № 2. – С. 60–73.
11. Грибанова Е.Б. Стохастические алгоритмы решения обратных задач экономического анализа с ограничениями // *Доклады ТУСУР*. – 2016. – № 4. – С. 112–116.
12. Мицель А.А. Методы оптимизации: учеб. пособие / А.А. Мицель, А.А. Шелестов. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2004. – 256 с.
13. Мицель А.А. Комбинаторная модель опционного портфеля / А.А. Мицель, М.Е. Семенов, М.Э. Фатянова // *Финансовая аналитика: проблемы и решения*. – 2016. – № 25(307). – С. 2–13.
14. Hamzacebi C. Continuous function minimization by dynamic random search / C. Hamzacebi, F. Kutay // *Applied Mathematical Modeling*. – 2007. – Vol. 31, No. 10. – P. 2189–2198.
15. Lei G. Adaptive random search in Quasi-Monte Carlo methods for global optimization // *Computers and Mathematics with Applications*. – 2007. – No. 6. – P. 747–754.

#### Грибанова Екатерина Борисовна

Канд. техн. наук, доцент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-6499-5893  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36  
Эл. почта: geb@asu.tusur.ru

#### Мустакимов Руслан Равильевич

Магистрант каф. АСУ ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36  
Эл. почта: mustakimov.ruslan97@gmail.com

Gribanova E.B., Mustakimov R.R.

#### Development of an algorithm for solving the inverse problem of profit formation with an integer constraint

The article presents an algorithm for solving the inverse problem of profit formation, which differs from the existing ones by taking into account the integer characteristics. Based on this algorithm, a web application is implemented to support decision-making to achieve the organization's targets.

**Keywords:** inverse problem, profit, integer programming, inverse calculations, web application.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-63-68

#### References

1. Ahuja R.K., Orlin J.B. Inverse Optimization, Part1: Linear Programming and General Problem. Cambridge, MIT, 1998, 35 p.
2. Ye N., Roosta-Khorasani F., Cui T. Optimization Methods for Inverse Problems. *MATRIX Annals*, 2017, vol. 2, pp. 121–140.
3. Odincov B.E. Obratnye vychislenija v formirovanii jeko-nomicheskikh reshenij [Inverse computations in forming of economic decisions]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004, 256 p.
4. Vishtak O.V., Shtyrova I.A. The use of technology of inverse calculations when monitoring the quality of additional education at the University. *Bulletin of Astrakhan State Technical University*, 2014, no. 2, pp. 67–73.
5. Barmina E.A., Kvjatkovskaja I.Ju. Quality monitoring of a commercial organization. The structuring of indicators. Application of cognitive maps. *Bulletin of Astrakhan State Technical University*, 2010, no. 2, pp. 15–20 (in Russ.).
6. Mart'janova A.V. The performance management of the bank using the inverse calculation. *Bulletin of the Magistracy*, 2015, no. 6, pp. 77–79 (in Russ.).
7. Bljumin S.L., Borovkova G.S. Application of finite change analysis and the method of inverse calculations in management and decision support systems. *Control Sciences*, 2018, no. 6, pp. 29–34 (in Russ.).
8. Gribanova E.B. Methods for solving inverse problems of economic analysis. *Corporate Finance*, 2016, no. 1, pp. 119–130 (in Russ.).
9. Gribanova E.B. Methods for solving inverse problems of economic analysis by minimizing argument increments. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, no. 2, pp. 95–99 (in Russ.).
10. Odintsov B.E., Romanov A.N. An iterative method of optimization of enterprise management by means of inverse calculations. *Bulletin of the Financial University*, 2014, no. 2, pp. 60–73 (in Russ.).

11. Gribanova E.B. Stochastic algorithms for solving the economic analysis inverse problems with constraints. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, no. 4, pp. 112–116 (in Russ.).

12. Micel' A.A., Shelestov A.A. *Metody optimizacii: uchebnoe posobie* [Optimization method]. Tomsk, TUSUR Publ., 2004. 256 p. (in Russ.).

13. Micel' A.A., Semenov M.E., Fat'janova M.Je. [Combinatorial model of an option portfolio]. *Financial Analytics: Science and Experience*, 2016, no.25, pp. 2–13 (in Russ.).

14. Hamzacebi C., Kutay F. Continuous function minimization by dynamic random search. *Applied Mathematical Modeling*, 2007, vol. 31, no.10, pp. 2189–2198.

15. Lei G. Adaptive random search in Quasi-Monte Carlo methods for global optimization. *Computers and Mathematics with Applications*, 2007, no. 6, pp. 747–754.

**Ekaterina B. Gribanova**

Candidate of Science in Engineering, Assistant Professor,  
Department of Automated Control System, Tomsk State  
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-6499-5893  
Phone.: +7 (382-2) 70-15-36  
Email: geb@asu.tusur.ru

**Ruslan R. Mustakimov**

Master student, Department of Automated Control System,  
TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone.: +7 (382-2) 70-15-36  
Email: ruslan97@gmail.com

УДК 621.314.521

В.М. Завьялов, Д.В. Бевз

## Разработка и исследование быстродействующих нелинейных регуляторов для синхронных двигателей с постоянными магнитами

Разработаны и исследованы алгоритмы управления электромагнитным моментом синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов, синтезированные на базе нелинейной теории автоматического управления, обеспечивающие высокие динамические показатели. Разработан новый алгоритм управления электромагнитным моментом синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов, получивший название «дифференциальное управление», отличающийся от рассмотренных алгоритмов высокой точностью воспроизведения управляющего воздействия в совокупности с максимальным быстродействием. Алгоритм основан на обеспечении равенства знака производной регулируемой координаты знаку ее ошибки.

**Ключевые слова:** следящий электропривод, синхронный двигатель с постоянными магнитами, система автоматического управления, нелинейное управление, электромагнитный момент, скользящее управление, метод скоростного градиента, динамические показатели.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-69-76

За прошедшие двадцать лет синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) нашел широкое распространение в электроприводах систем слежения и наведения. Для электроприводов, эксплуатируемых в данной отрасли, предъявляются требования к обеспечению высокой точности регулирования заданной координаты и формированию высоких динамических показателей при изменении управляющего или возмущающего воздействий.

Исторически сложилось, что одним из первых электродвигателей, используемых в электроприводах систем слежения и наведения и удовлетворяющих предъявляемым требованиям, стал двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ). Для управления ДПТ НВ были разработаны алгоритмы на базе линейной теории автоматического управления – это управление по принципу подчиненного регулирования координат [1–3], при использовании которого каждый контур управления регулирует конкретную переменную состояния электропривода и содержит регулятор, настроенный на заданный оптимум, а также модальное управление [4, 5], реализуемое в виде одного регулятора, формирующего вектор напряжения с использованием обратных связей по вектору состояния объекта управления.

Развитие силовой преобразовательной техники с применением полупроводниковых полностью управляемых ключей, а также развитие электроприводов на базе электрических машин переменного тока происходило более интенсивными темпами, чем развитие теории управления электродвигателями переменного тока. В результате для управления машинами данного типа нашли применение алгоритмы управления, разработанные ранее и применяемые для управления коллекторными машинами постоянного тока.

Интерес к применению СДПМ в электроприводах переменного тока начал проявляться в начале

20-х годов прошлого столетия с открытием новых магнитомягких материалов для изготовления постоянных магнитов, устанавливаемых на роторе двигателя. СДПМ обладают целым рядом преимуществ по сравнению с электродвигателями других типов, основные из которых – это малые значения электромагнитной и электромеханической постоянных времени; меньшие габариты на единицу развиваемой мощности; отсутствие на роторе щеточно-коллекторного узла у других электрических контактов; широкий диапазон регулирования частоты вращения; большая перегрузочная способность; высокий КПД [6].

Для управления электромагнитным состоянием СДПМ сформировались два принципиальных метода управления, относящихся к классу векторных алгоритмов:

1. Полеориентированное управление [7, 8].

2. Прямое управление моментом, ставшее развитием релейных способов управления [9–11].

Между представленными алгоритмами существуют противоречия в части обеспечения высокой точности регулирования и динамики движения к цели управления.

Так, алгоритм полеориентированного управления обеспечивает высокую точность воспроизведения и поддержания заданной величины (статическая ошибка не превышает 5% от заданной величины), но в силу наличия в системе управления внешних инерционных контуров регулирования динамические показатели системы оказываются заниженными.

Алгоритм прямого управления моментом, наоборот, обеспечивает предельные динамические параметры системы в результате непосредственного управления ключами силового преобразователя, как правило, по заранее разработанной таблице переключений. Однако при использовании данного алгоритма характерны пульсации электромагнитного момента на валу двигателя порядка 20% от заданной величины и более.

Дальнейшее развитие приведенных алгоритмов было направлено на улучшение качества управления. Так, например, модернизация алгоритма прямого управления моментом заключается в разработке новых оптимальных последовательностей коммутации силовых ключей инвертора [12–14], а также использовании моделей с прогнозированием [15–18] для выбора оптимального вектора напряжения в зависимости от задания и обратной связи регулируемой величины на заданном шаге расчета. Несмотря на то, что данные методы способствуют снижению пульсаций электромагнитного момента на валу СДПМ, алгоритмы на базе прогнозирующих моделей являются итерационными, в результате чего увеличивается время расчета управляющего воздействия, что приводит к ухудшению динамических характеристик при изменении управления.

Модернизация алгоритма полеориентированного управления направлена на разработку адаптивных алгоритмов, использующих адаптируемые или эталонные модели [19–21], направленные на компенсацию известных в системе возмущений; на разработку наблюдателей состояния СДПМ [22–24], при использовании которых появляется возможность отказаться от датчика положения ротора, вследствие чего повышается надежность электропривода, а также алгоритмы ослабления магнитного потока постоянных магнитов [25, 26] позволяют расширить диапазон регулирования по частоте вращения. Так или иначе, модификация алгоритмов управления СДПМ определяется, в первую очередь, областью применения электропривода на базе СДПМ.

Тем не менее на практике отсутствует такой метод управления, который обеспечивал бы предельные динамические показатели следящих электроприводов на базе СДПМ одновременно с высокой точностью стабилизации заданной переменной.

#### Математическая модель СДПМ

При разработке систем управления СДПМ нашла хорошо зарекомендовавшая себя математическая модель в декартовой системе координат  $dq$ , связанная с ротором и полученная путем применения координатных преобразований Парка–Горева. Ось  $d$  данной системы координат ориентируют по направлению магнитного поля постоянных магнитов, а ось  $q$  – ей ортогональна.

Математическая модель СДПМ во вращающейся системе координат  $dq$  описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \begin{cases} -\frac{Ri_d}{L_d} + \frac{z_p \omega_m L_q i_q}{L_d} + \frac{u_d}{L_d}; \\ -\frac{Ri_q}{L_q} - \frac{z_p \omega_m (i_d L_d + \Psi_f)}{L_q} + \frac{u_q}{L_q}; \\ \frac{M}{J} - \frac{M_c}{J}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{x} = [i_d \quad i_q \quad \omega_m]^T$  – вектор переменных состояния;  $\mathbf{u} = [u_d \quad u_q \quad 0]^T$  – вектор управляющих воз-

действий;  $R$  – активное сопротивление фазы обмотки статора;  $L_d$  и  $L_q$  – собственные индуктивности фаз обмотки статора по продольной и поперечной осям соответственно;  $z_p$  – число пар полюсов;  $\omega_m$  – угловая механическая частота вращения ротора СДПМ;  $\Psi_f$  – модуль вектора потокоцепления магнитного поля постоянных магнитов ротора с обмоткой статора;  $J$  – момент инерции ротора;  $M$  – электромагнитный момент СДПМ;  $M_c$  – момент сопротивления.

#### Скользящее управление электромагнитным моментом СДПМ

В настоящее время для управления электроприводом на базе СДПМ широкое распространение получили алгоритмы, синтезированные на базе теории скользящих режимов управления [27–32]. Скользящее управление СДПМ с применением пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) демонстрирует высокие динамические показатели системы, а также инвариантность к известным в системе возмущениям.

Суть скользящего управления заключается в организации асимптотически устойчивого движения динамической системы вдоль и по пересечению поверхности скольжения, представляющей собой траекторию на фазовой плоскости и являющейся заданным уравнением движения системы к цели управления.

Для синтеза скользящего управления рассматриваются проекции уравнений движения динамической системы на подпространство ошибок управляемых переменных [28]. Представим цель управления в следующем виде:

$$\begin{cases} e_d = (i_d^* - i_d) \rightarrow 0; \\ e_q = (i_q^* - i_q) \rightarrow 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $(i_d^* - i_d)$  и  $(i_q^* - i_q)$  – разница между желаемым и текущим значением.

Тогда проекция системы уравнений (1) на подпространство ошибок управления переменных (2) будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{de_d}{dt} = -\frac{R}{L_d} e_d + \frac{z_p \omega_m L_q}{L_d} e_q - \frac{u_d}{L_d} + E_d; \\ \frac{de_q}{dt} = -\frac{R}{L_q} e_q - \frac{z_p \omega_m L_d}{L_q} e_d - \frac{u_q}{L_q} + E_q, \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } E_d = \left( \frac{R}{L_d} i_d^* - \frac{z_p \omega_m L_q}{L_d} i_q^* \right),$$

$$E_q = \left( \frac{R}{L_q} i_q^* + \frac{z_p \omega_m L_d}{L_q} i_d^* + \frac{z_p \omega_m \Psi_f}{L_q} \right).$$

Слагаемые  $E_d$  и  $E_q$  при синтезе алгоритма скользящего управления рассматриваются как внешнее воздействие на динамическую систему (1).

Зададим поверхность скольжения в виде пропорционально-интегрального закона регулирования:

$$\mathbf{S} = \begin{cases} c_d \int e_d dt + e_d; \\ c_q \int e_q dt + e_q. \end{cases} \quad (4)$$

Определим условия возникновения скользящего режима по пересечению поверхностей скольжения, продифференцировав (4) по времени и приравняв к нулю:

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \begin{cases} c_d e_d + \frac{de_d}{dt} = 0; \\ c_q e_q + \frac{de_q}{dt} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя (3) в (5) и принимая, что внешние воздействия на (1) отсутствуют, получим компоненты управляющих воздействий для статического режима:

$$\mathbf{u}_{eq} = \begin{cases} L_d \left[ \left( c_d - \frac{R}{L_d} \right) e_d + \frac{z_p \omega_m L_q}{L_d} e_q \right]; \\ L_q \left[ \left( c_q - \frac{R}{L_q} \right) e_q - \frac{z_p \omega_m L_d}{L_q} e_d \right]. \end{cases} \quad (6)$$

Для того чтобы обеспечить попадание на поверхность скольжения, система уравнений (6) дополняется компонентами управления, определяющими динамику и закон достижения цели регулирования.

Тогда вектор управляющих воздействий определится как

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{eq} + \mathbf{u}_{sw} = \begin{cases} L_d \left[ \left( c_d - \frac{R}{L_d} \right) e_d + \frac{z_p \omega_m L_q}{L_d} e_q + \varepsilon_d \text{sign}(S_d) \right]; \\ L_q \left[ \left( c_q - \frac{R}{L_q} \right) e_q - \frac{z_p \omega_m L_d}{L_q} e_d + \varepsilon_q \text{sign}(S_q) \right], \end{cases} \quad (7)$$

где  $\varepsilon_d > |L_d| |E_d|$  и  $\varepsilon_q > |L_q| |E_q|$  – весовые коэффициенты, определяющие динамику движения к цели управления и его асимптотическую устойчивость.

Значения весовых коэффициентов находятся согласно второму методу А.М. Ляпунова [28] об определении устойчивости движения.

### Градиентное управление электромагнитным моментом СДПМ

В нелинейной теории автоматического управления известен метод скоростного градиента, который демонстрирует высокие динамические показатели при управлении нелинейными динамическими системами [33, 34]. В [35] показаны результаты его применения для синтеза алгоритма управления асинхронным двигателем. Рассмотрим его применение относительно СДПМ.

Синтез градиентного управления сводится к определению скалярной функции  $\omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ , представляющей скорость изменения целевой функции  $Q(\mathbf{x}, t)$  в силу уравнений объекта управления:

$$\omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \frac{\partial Q(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \left[ \frac{\partial Q(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}} \right]^T \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t).$$

Сформируем целевую функцию в следующем виде:

$$Q(\mathbf{x}, t) = 0,5 \left[ \mathbf{y} - \mathbf{y}^* \right]^T \mathbf{H} \left[ \mathbf{y} - \mathbf{y}^* \right],$$

где  $\mathbf{y} - \mathbf{y}^*$  – разница между текущим и желаемым состоянием,  $\mathbf{H}$  – симметричная положительно определенная матрица весовых коэффициентов, определяющих внутреннюю динамику объекта управления.

Оперируя условиями возникновения электромагнитного момента в СДПМ, сформируем следующие цели управления для алгоритма градиентного управления:

$$\begin{cases} (i_d - i_d^*) \rightarrow 0; \\ (M - M^*) \rightarrow 0, \end{cases} \quad (8)$$

где значение электромагнитного момента  $M$  определяется по формуле

$$M = \frac{3}{2} z_p (i_q \psi_f + (L_d - L_q) i_d i_q). \quad (9)$$

Тогда целевая функция примет следующий вид:

$$\begin{aligned} Q(\mathbf{x}, t) &= 0,5 \begin{bmatrix} i_d - i_d^* \\ M - M^* \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} h_1 & 0 \\ 0 & h_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d - i_d^* \\ M - M^* \end{bmatrix} = \\ &= 0,5 h_1 (i_d - i_d^*)^2 + 0,5 h_2 (M - M^*)^2 = 0,5 h_1 (i_d - i_d^*)^2 + \\ &+ 0,5 h_2 \left( 1,5 i_q (\psi_f + i_d (L_d - L_q)) - M^* \right)^2. \end{aligned}$$

Градиент функции  $\omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$  по  $\mathbf{u}$  формирует такое изменение направления управляющего воздействия, при котором будет максимально интенсивное движение к цели управления:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\mathbf{\Gamma} \frac{\partial \omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} = -\mathbf{\Gamma} \left[ \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} \right]^T \frac{\partial Q(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}},$$

где  $\mathbf{\Gamma}$  – положительная диагональная матрица усиления, определяющая динамику движения к цели управления;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ \frac{\partial Q(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} h_1 (i_d - i_d^*) - 1,5 h_2 i_q (L_d - L_q) (M^* - M) \\ -1,5 (\psi_f + i_d (L_d - L_q)) (M^* - M) \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Алгоритм управляющего воздействия реализуем с применением пропорционально-интегрального закона регулирования:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{\Gamma}_{II} \frac{\partial \omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} - \mathbf{\Gamma}_I \int \frac{\partial \omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}}.$$

### Дифференциальное управление электромагнитным моментом СДПМ

Основные принципы дифференциального управления изложены в [36]. Для разработки алгоритма управления электромагнитным моментом СДПМ, представим цели управления, сформулированные в (8), в следующем виде:

$$\begin{cases} (i_d^* - i_d) \rightarrow 0; \\ (M^* - M) \rightarrow 0. \end{cases} \quad (10)$$

Анализируя движение рассматриваемой динамической системы к поставленным целям управления, определим необходимое и достаточное условие для гарантированного и максимально эффективного достижения цели регулирования:

$$\begin{cases} \text{sign}(i_d^* - i_d) = \text{sign}\left(\frac{di_d}{dt}\right); \\ \text{sign}(M^* - M) = \text{sign}\left(\frac{dM}{dt}\right). \end{cases} \quad (11)$$

Вычислим аналитически производные  $\frac{di_d}{dt}$  и  $\frac{dM}{dt}$ :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{Ri_d}{L_d} + \frac{z_p \omega_m L_q i_q}{L_d} + \frac{u_d}{L_d}; \\ \frac{dM}{dt} = \frac{3}{2} z_p \left( \frac{di_q}{dt} \psi_f + (L_d - L_q) \left( \frac{di_d}{dt} i_q + \frac{di_q}{dt} i_d \right) \right). \end{cases} \quad (12)$$

Определим компоненты вектора напряжений, обеспечивающие неизменность целей управления, приравняв уравнения системы (12) к нулю.

Для первой цели управления

$$u_{deq} = Ri_d - z_p \omega_m L_q i_q. \quad (13)$$

Для второй цели управления

$$\begin{cases} u_{deq} = Ri_d - z_p \omega_m L_q i_q; \\ u_{qe} = Ri_q + z_p \omega_m (L_d i_d + \psi_f). \end{cases} \quad (14)$$

Тогда для первого слагаемого системы уравнений (12) справедливо выполнение следующих условий:

$$\frac{di_d}{dt} > 0 \Rightarrow Ri_d - z_p \omega_m L_q i_q > 0,$$

$$\frac{di_d}{dt} < 0 \Rightarrow Ri_d - z_p \omega_m L_q i_q < 0.$$

А для второго слагаемого системы уравнений (12) – выполнение нижеприведенных условий:

$$\frac{dM}{dt} > 0 \Rightarrow \begin{cases} Ri_d - z_p \omega_m L_q i_q > 0; \\ Ri_q + z_p \omega_m (L_d i_d + \psi_f) > 0, \end{cases}$$

$$\frac{dM}{dt} < 0 \Rightarrow \begin{cases} Ri_d - z_p \omega_m L_q i_q < 0; \\ Ri_q + z_p \omega_m (L_d i_d + \psi_f) < 0. \end{cases}$$

Для обеспечения выполнения условий (11), дополним компоненту вектора напряжений (13) слага-

емым  $h_{11}(i_d^* - i_d)$ , а компоненту (14) – членами  $h_{12}(M^* - M)$  и  $h_2(M^* - M)$  соответственно. Объединив компоненты вектора напряжений по соответствующим координатам, получим алгоритм управления электромагнитным моментом СДПМ

$$\begin{cases} u_d = \left[ h_{11}(i_d^* - i_d) + (Ri_d - z_p \omega_m L_q i_q) \right] + \\ + \left[ h_{12}(M^* - M) + (Ri_d - z_p \omega_m L_q i_q) \right]; \\ u_q = h_2(M^* - M) + Ri_q + z_p \omega_m (L_d i_d + \psi_f). \end{cases} \quad (15)$$

Значения весовых коэффициентов  $h_{11}$ ,  $h_{12}$  и  $h_2$  будут определять динамику движения к цели управления. Причем вес слагаемого  $h_{11}(i_d^* - i_d)$  должен быть больше, чем у слагаемого  $h_{12}(M^* - M)$ .

Обеспечение предельного быстродействия будет при формировании максимального фазного напряжения, при этом компонента вектора напряжения по оси  $q$  в разработанном алгоритме является моментно-образующей, а компонента вектора напряжения по оси  $d$  обеспечивает сохранность ориентации вращающейся системы координат  $dq$  и формирование оптимального угла нагрузки с целью обеспечения максимально возможного электромагнитного момента СДПМ.

### Имитационное моделирование разработанных алгоритмов

Исследование нелинейных алгоритмов управления электромагнитным моментом электропривода на базе СДПМ проводилось в программном продукте MATLAB Simulink.

Управление электрическим приводом осуществляется в моментном контуре при ступенчатом изменении задания электромагнитного момента. Момент сопротивления на валу двигателя имеет реактивный характер и составляет 50% от заданного значения электромагнитного момента.

На рис. 1 приведена функциональная схема исследуемого электропривода на базе СДПМ.

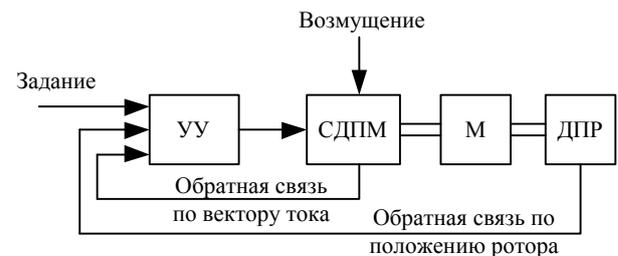


Рис. 1. Функциональная схема электропривода на базе СДПМ: УУ – устройство управления; М – инерционная масса на валу электродвигателя; ДПР – датчик положения ротора

На рис. 2 представлены осциллограммы переходных процессов при дифференциальном управлении моментом.

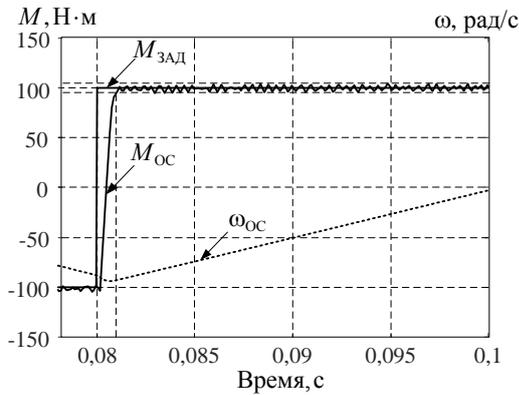


Рис. 2. Переходный процесс электромагнитного момента при использовании алгоритма дифференциального управления:

$M_{зад}$  – заданное значение электромагнитного момента;  
 $M_{ос}$  – обратная связь по электромагнитному моменту;  
 $\omega_{ос}$  – обратная связь по угловой частоте вращения

На рис. 3 представлены осциллограммы переходных процессов при скользящем управлении моментом.

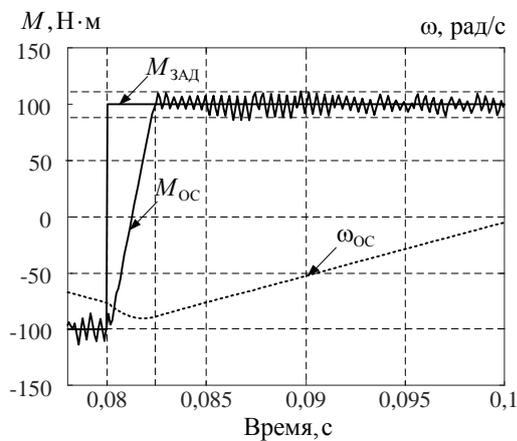


Рис. 3. Переходный процесс электромагнитного момента при использовании алгоритма скользящего управления

На рис. 4 представлены осциллограммы переходных процессов при градиентном управлении моментом.

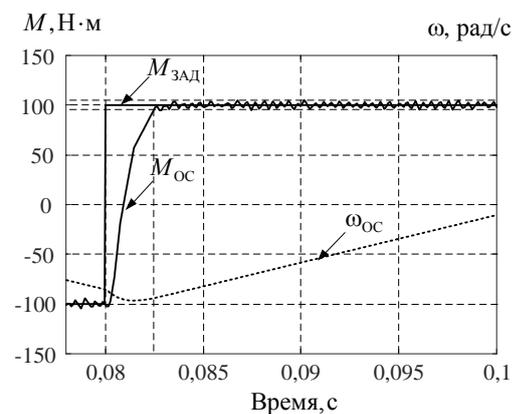


Рис. 4. Переходный процесс электромагнитного момента при использовании алгоритма градиентного управления

Основные показатели качества переходного процесса для исследуемых алгоритмов представлены в таблице.

**Показатели качества переходного процесса электромагнитного момента для исследуемых алгоритмов управления**

Алгоритм управления	Показатели качества переходного процесса		
	Время переходного процесса $t_p$ , мс	Точность регулирования, $\Delta$ , %	Перерегулирование, $\sigma$ , %
Дифференциальное управление	1*	$\pm 2,5\% M_{зад}$	0
Скользящее управление	2,5*	$\pm 10\% M_{зад}$	0
Градиентное управление	2,6*	$\pm 2\% M_{зад}$	0

\* При периоде дискретизации контура управления 100 мкс.

**Заключение**

Исследованные нелинейные алгоритмы на базе метода скоростного градиента и теории скользящих режимов, используемые для управления электромагнитным состоянием электрического привода на базе СДПМ, демонстрируют высокие динамические показатели. Тем не менее скользящий режим управления уступает градиентному управлению по точности поддержания заданной величины. Это связано с использованием в регуляторе знаковой функции от ошибки регулируемой координаты, умноженной на постоянный коэффициент усиления, который для обеспечения устойчивого движения к цели управления должен иметь большой вес.

Разработанный алгоритм дифференциального управления обеспечивает наилучшие динамические показатели одновременно с сохранением высокой точности регулирования.

*Литература*

- Блейз Е.С. Динамика электромашинных следящих систем / Е.С. Блейз, Ю.Н. Семенов, Б.К. Чемоданов, Н.М. Якименко. – М.: Энергия, 1967. – 408 с.
- Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
- Чилинкин М.Г. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чилинкин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
- Бобцов А.А. Линейные системы автоматического управления / А.А. Бобцов, И.В. Мирошник. – СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2001. – 245 с.
- Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. – СПб.: Питер, 2005. – 336 с.
- Балковой А.П. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями / А.П. Балковой, В.К. Цаценкин. – М.: ИД МЭИ, 2010. – 328 с.
- Blaschke F. Das Prinzip der Fildorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens Zeitschrift. – 1971. – No. 10. – P. 757–760.
- Bose B.K. Modern power electronics and AC drives. – Upper Saddle River, Prentice Hall, 2002. – 711 p.
- Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. – Oxford, Oxford University Press, 1998. – 729 p.

10. Depenbrock M. Direct self-control (DSC) of Inverter – fed induction machine // IEEE transactions on energy conversion. – 1988. – Vol. 3, No. 4. – P. 254–260.
11. Takeshita T. Sensorless Brushless DC Motor Drive with EMF Constant Identifier / T. Takeshita, N. Matsui // IECON – 94. – 1994. – Vol. 1. – P. 8–13.
12. Hesna A. Improvement of Direct Torque Control Performances Using FCS-MPC and SVM Applied to PMSM: Study and Comparison / A. Hesna, S. Djamel, R. Djamel // Transactions on Power Electronics. – 2018. – P. 1–6.
13. Paturca S. Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) – an approach by using Space Vector Modulation (SVM) / S. Paturca, M. Covrig, L. Melces Cu // Proceedings of the 6th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems. – 2006. – P. 111–116.
14. Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor based on Space Vector Modulation Control / Y. Yang, R. Hunag, Y. Yu, S. Wang // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference. – 2016. – P. 823–827.
15. A MPC method based on the oval invariant set for PMSM Speed Control System / WANG Yong-bin, H. Xiaodong, C. Yi, X. Xin-qi // 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control. – 2016. – P. 575–578.
16. A robust deadbeat predictive control scheme for dual three-phase PMSM / Y. Zhang, T. Zhao, H. Jing, J. Li, X. Gui // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems. – 2018. – P. 1223–1228.
17. Leuer M. Efficiency-Optimized Model Predictive Torque Control for IPMSM / M. Leuer, A. Ruring, J. Bocker // ENERGYCON 2014. – 2014. – P. 9–13.
18. Araki Y. MPDCC Based High Efficiency Harmonic Reduction Control for IPMSM Driven by Electrolytic Capacitorless Inverter / Y. Araki, K. Ohishi, Y. Yokokura // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – P. 589–594.
19. Kang J. Predictive Current Control with Torque Ripple Minimization for PMSM of Electric Vehicles / J. Kang, X. Li, Y. Liu // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – P. 765–771.
20. Speed Control of IPMSM Motor Drives Using Model Reference Adaptive Technique / S. Amornwongpeeti, O. Kiselychnyk, J. Wang, N. Shah, M. Soumelidis // Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Applied Innovation. – 2017. – P. 672–675.
21. Static Error Elimination Algorithm for PMSM Predictive Current Control / W. Geng, Y. Ming, N. Li, G. Xianguo, X. Dianguo // Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. – 2014. – P. 7691–7696.
22. Hamabe Y. Extended EMF-based Simple IPMSM Sensorless Vector Control Considering Cross Coupling Compensation / Y. Hamabe, M. Tsuji, S. Hamasaki // IEEE Transactions on Industrial Applications. – 2018. – P. 45–51.
23. Improved Rotor Flux Observer for Sensorless Control of PMSM with Adaptive Harmonic Elimination and Phase Compensation / W. Xu, L. Wang, Y. Liu, F. Blaabjerg // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. – 2019. – P. 1–9.
24. Eskola M. Speed and Position Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors in Matrix Converter and Voltage Source Converter Applications. – Tampere, Tampere University of Technology, 2006. – 169 P.
25. Mtsumoto A. A Flux-Weakening Control Method on Maximum Torque Control Frame for IPMSM Position Sensorless Control / A. Mtsumoto, M. Hasegawa, S. Doki // IEEE Transactions on Industrial Applications. – 2012. – P. 1612–1617.
26. Xinhail J. Novel PMSM Filed-Weakening Control Method / J. Xinhail, Z. Yanneng, X. Dianguo // IEEE Transactions on Industrial Applications. – 2017. – P. 3744–3748.
27. Борцов Ю.А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю.А. Борцов, В.В. Поляков, В.В. Путов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
28. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применения в системах с переменными структурами. – М.: Наука, 1974. – 272 с.
29. Sun X. Design and Application Of Sliding Mode Controller In PMSM Position Tracking Control Based On Adaptive Backstepping / X. Sun, H. Yu, X. Liu // IEEE Transactions on Industrial Applications. – 2018. – P. 3507–3511.
30. Combined Speed and Current Terminal Sliding Mode Control with Nonlinear Disturbance Observer for PMSM Drive / X. Liu, H. Yu, J. Yu, L. Zhao // IEEE Transactions on Industrial Applications. – 2018. – P. 29594–29601.
31. An Improved Sliding Mode Control Using Disturbance Torque Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor / Q. Wang, H. Yu, M. Wang, X. Qi // IEEE Transactions on Industrial Applications. – 2019. – Vol. 7. – P. 36691–36701.
32. Improved Continuous Fast Terminal Sliding Mode Control with Extended State Observer for Speed Regulation of PMSM Drive System / W. Xu, A.K. Junejo, Y. Liu, Md.R. Islam // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – Vol. 68, No. 11. – P. 10465–10476.
33. Мирошник И.В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
34. Фрадков А.Л. Схема скоростного градиента и ее применение в задачах адаптивного управления // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 9. – С. 90–101.
35. Завьялов В.М. Многокритериальное управление асинхронным электроприводом / В.М. Завьялов, А.А. Неверов, И.Ю. Семькина // Вестн. КузГТУ. – 2005. – № 1. – С. 81–84.
36. Завьялов В.М. Общие принципы управления процессом электромеханического преобразования энергии // Электричество. – 2013. – № 2. – С. 34–42.

#### **Завьялов Валерий Михайлович**

Д-р техн. наук, доцент, зав. каф. электроэнергетических систем атомных станций Севастопольского государственного университета (СевГУ)  
 Университетская ул., 33, г. Севастополь, Россия, 299053  
 Тел.: +7-904-372-01-73  
 Эл. почта: vmzavyalov@sevsu.ru

#### **Бевз Денис Владиславович**

Инженер ООО «НПФ Мехатроника-Про»  
 Фрунзе пр-т, 119Е, г. Томск, Россия, 634021  
 Тел.: +7-923-404-81-94  
 Эл. почта: d.v.bevz@mail.ru

Zavyalov V.M., Bevs D.V.

#### **Development and study of PMSM nonlinear controllers providing quick response and electromagnetic torque accurate control**

A permanent magnet synchronous motor electromagnetic torque control algorithms providing high dynamic performances based on the nonlinear automatic control theory were developed and studied. The new nonlinear control algorithm,

called «differential control», that provides accurate torque control with a quick response, was developed. This algorithm is based on equality of controlled variable derivative sign and its error sign.

**Keywords:** servo drive, permanent magnet synchronous motor, automatic control, nonlinear control, electromagnetic torque, sliding mode control, gradient control, dynamic performances.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-69-76

### References

1. Bleiz E.S., Semenov Y.N., Chemodanov B.K., Yakimenko N.M. Dinamika elektromashinnyh sledyashyh system [Dynamics of electro machines servo systems]. M., Energiya Publ., 1967, 408 p. (in Russ.).
2. Kluchev V.I. Teoriya elektroprivoda [Electric drive theory]. M., Energoatomizdat Publ., 2001, 704 p. (in Russ.).
3. Chilinkin M.G., Kluchev V.I., Sandler A.S. Teoriya avtomatizirovannogo elektroprivoda [Automatic electric drive theory]. M., Energiya Publ., 1979 (in Russ.).
4. Bobcov A.A., Miroshnik I.V. Lineinye sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Linear automatic control systems]. SPb., SPBITMO (TU) Publ., 2001, 245 p. (in Russ.).
5. Miroshnik I.V. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Lineinye sistemy [Automatic control theory. Linear systems]. SPb., Piter Publ., 2005, 336 p. (in Russ.).
6. Balkovoy A.P., Cacenkin V.K. Precizionnyy elektroprivod s ventilnymi dvigatelyami [High-precision electric drive with permanent magnet synchronous motors]. M., Izdatelsky dom MEI Publ., 2010, 328 p. (in Russ.).
7. Blaschke F. Das Prinzip der Fildorientierung die Grundlage fur die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen. *Siemens Zeitschrift*, 1971, no. 10, pp. 757–760.
8. Bose B.K. *Modern power electronics and AC drives*. Upper Saddle River, Prentice Hall, 2002. 711 p.
9. Vas P. *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. Oxford, Oxford University Press, 1998. 729 p.
10. Depenbrock M. Direct self-control (DSC) of Inverter – fed induction machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1988, vol. 3, no. 4, pp. 254–260.
11. Takeshita T., Matsui N. Sensorless Brushless DC Motor Drive with EMF Constant Identifier. *IECON-94*, 1994, vol. 1, pp. 8–13.
12. Hesna A., Djamel S., Djamel R. Improvement of Direct Torque Control Performances Using FCS-MPC and SVM Applied to PMSM: Study and Comparison. *Transactions on Power Electronics*, 2018, pp. 1–6.
13. Paturca S., Covrig M., Melces Cu L. Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) – an approach by using Space Vector Modulation (SVM). *Proceedings of the 6th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems*, 2006, pp. 111–116.
14. Yang Y., Hunag R., Yu Y., Wang S. Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor based on Space Vector Modulation Control. *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2016, pp. 823–827.
15. Wang Y., Xiao-dong H., Yi C., Xin-qi X. A MPC method based on the oval invariant set for PSMSM Speed Control System. *2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control*, 2016, pp. 575–578.
16. Zhang Y., Zhao T., Jing H., Li J., Gui X. A robust deadbeat predictive control scheme for dual three-phase PMSM, *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2018, pp. 1223–1228.
17. Leuer M., Ruring A., Bocker J. Efficiency-Optimized Model Predictive Torque Control for IPMSM. *ENERGYCON 2014*, 2014, pp. 9–13.
18. Araki Y., Ohishi K., Yokokura Y. MPDCC Based High Efficiency Harmonic Reduction Control for IPMSM Driven by Electrolytic Capacitorless Inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, pp. 589–594.
19. Kang J., Li X., Liu Y. Predictive Current Control with Torque Ripple Minimization for PMSM of Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, pp. 765–771.
20. Amornwongpeeti S., Kiselychynk O., Wang J., Shah N., Soumelidis M. Speed Control of IPMSM Motor Drives Using Model Reference Adaptive. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Applied Innovation*, 2017, pp. 672–675.
21. Geng W., Ming Y., Li N., Xianguo G., Dianguo X. Static Error Elimination Algorithm for PMSM Predictive Current Control. *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, 2014, pp. 7691–7696.
22. Hamabe Y., Tsuji M., Hamasaki S. Extended EMF-based Simple IPMSM Sensorless Vector Control Considering Cross Coupling Compensation. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2018, pp. 45–51.
23. Xu W., Wang L., Liu Y., Blaabjerg F. Improved Rotor Flux Observer for Sensorless Control of PMSM with Adaptive Harmonic Elimination and Phase. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2019, pp. 1–9.
24. Eskola M. *Speed and Position Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors in Matrix Converter and Voltage Source Converter Applications*. Tampere, Tampere University of Technology, 2006, 169 p.
25. Mtsumoto A., Hasegawa M., Doki S. A Flux-Weakening Control Method on Maximum Torque Control Frame for IPMSM Position Sensorless Control. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2012, pp. 1612–1617.
26. Xinhail J., Yanneng Z., Dianguo X. Novel PMSM Filed-Weakening Control Method. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2017, pp. 3744–3748.
27. Borcov Y.A., Polyahov V.V., Putov V.V. Elektromechanicheskie sistemy s adaptivnym I modalnym upravleniem [Electromechanic systems with adaptive and full state feedback control]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984, 216 p. (in Russ.).
28. Utkin V.I. Skolzyashie rezhimy I ih primeneniya v sistemah s peremennymi strukturami [Sliding modes and its applications in variable structure systems]. M., Nauka Publ., 1974, 272 p. (in Russ.).
29. Sun X., Yu H., Liu X. Design and Application Of Sliding Mode Controller In PMSM Position Tracking Control Based On Adaptive Backstepping. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2018, pp. 3507–3511.
30. Liu X., Yu H., Yu J., Zhao L. Combined Speed and Current Terminal Sliding Mode Control With Nonlinear Disturbance Observer for PMSM Drive. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2018, pp. 29594–29601.
31. Wang Q., Yu H., Wang M., Qi X. An Improved Sliding Mode Control Using Disturbance Torque Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2019, vol. 7, pp. 36691–36701.
32. Xu W., Junejo A. K., Liu Y., Islam Md. R. Improved Continuous Fast Terminal Sliding Mode Control With Extended State Observer for Speed Regulation of PMSM Drive System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, vol. 68, no. 11, pp. 10465–10476.

33. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami [Difficult dynamic systems nonlinear and adaptive control]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2000, 549 p. (in Russ.).

34. Fradkov A.L. [Speed-gradient scheme and its application in adaptive control problems]. *Autom. Remote Control*, 1979, no. 9, pp. 90–101.

35. Zvyalov V.M., Neverov A.A., Semykina I.Yu [Asynchronous electric drive multicriteria control]. *Bulletin of KuzGTU*, 2005, no. 1, pp. 81–84 (in Russ.).

36. Zavyalov V.M. [Energy electromechanical conversion controlling process main principles]. *Electricity*, 2013, no. 2, pp. 34–42 (in Russ.).

**Valery M. Zavyalov**

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department of Electric Power Systems of Nuclear Power Plants, Sevastopol State University  
33, Universytetskaya st., Sevastopol, Russia, 299053  
Phone: +7-904-372-01-73  
Email: vmzavyalov@sevsu.ru

**Denis V. Bevz**

Engineer, «Mechatronica-Pro»  
119E, Frunze pr., Tomsk, Russia, 634021  
Phone: +7-923-404-81-94  
Email: d.v.bevz@mail.ru

## **СООБЩЕНИЯ**



УДК 538.971

А.В. Тюньков, Д.Б. Золотухин, Ю.Г. Юшков, А.В. Казаков

## Ионно-плазменное травление, инициированное электронным пучком

Представлены результаты травления образца кварца потоком энергичных ионов из пучковой плазмы. Плазма генерировалась в диэлектрической колбе при инъекции в нее непрерывного электронного пучка. Процесс травления осуществлялся в среде аргона при давлении 2,7 Па. Энергия бомбардирующих ионов регулировалась падением напряжения на слое между границей плазмы и дном полости в результате ее зарядки электронами пучка. Электронный пучок был единственным источником генерации ионов и регулирования их энергии. Установлено, что скорость травления растет с ростом энергии электронного пучка вслед за увеличением абсолютной величины придонного падения напряжения.

**Ключевые слова:** травление диэлектриков, пучковая плазма, электронный источник с плазменным катодом, средний вакуум.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-79-84

Электронные пучки широко используются в технологическом оборудовании для нагрева, сварки, плавки, размерной обработки, распыления, фундаментальных и прикладных исследований, в том числе в нанотехнологиях [1, 2]. Так как диапазоны мощности и концентрации энергии в электронном пучке велики, возможно получение всех видов термического воздействия на материал: нагрев его до заданных температур, плавление и испарение с высокими скоростями [3, 4]. В качестве источников электронных пучков, работающих в условиях высокого вакуума (порядка  $10^{-2}$  Па), исторически широко используются устройства с термокатодом [4, 5]. Однако в условиях реального производства использование данных устройств затруднительно по причине ряда факторов, ограничивающих интервал бесперебойной работы источника: высокие требования к чистоте вакуума, направленный парогазовый поток из области расплава, частая разгерметизация вакуумной камеры. Данные факторы обусловили разработку источников электронов, альтернативных термокатодным. В результате исследований в данном направлении были разработаны источники с плазменным катодом на основе высоковольтного тлеющего разряда [6], источники с поверхностным разрядом и на основе взрывной эмиссии [7] и источники электронов с плазменным эмиттером [8].

Среди разработчиков источников электронов с плазменным катодом в последние годы являются популярными исследования, направленные на увеличение рабочего давления электронного источника до форвакуумного диапазона [9, 10]. Транспортировка электронного пучка в атмосфере газа данного диапазона давлений обеспечивает генерацию пучковой плазмы, что значительно расширяет применение электронных источников. Генерируемая плазма пучка успешно применяется в процессах азотирования поверхности различного рода металлов и сплавов [11, 12], обеззараживания внутренних поверхностей сосудов [13], формирования покрытий из газовой фазы [14], травления поверхности [15]. А способность нейтрализовать накопленный заряд, привне-

сенный электронным пучком, с поверхности непроводящей мишени позволила осуществить процессы спекания, сварки и пайки электрически непроводящих изделий, осаждения диэлектрических покрытий на основе керамики [16] и бора [17].

В указанных выше процессах электронный пучок используется как источник нагрева либо испарения облучаемой поверхности, а генерируемая им плазма – как нейтрализатор заряда либо инициатор плазмохимической реакции. Свойство пучка приносить электрический заряд в представленных выше процессах и заряжать таким образом обрабатываемую поверхность диэлектрика до определенного отрицательного потенциала ранее считалось нежелательным эффектом. Эффект зарядки поверхности обрабатываемого образца электронным пучком может оказаться весьма полезным для организации травления поверхности диэлектрической мишени ионами пучковой плазмы. В среднем вакууме для осуществления ионного травления электронный луч уже использовался [15], но только в качестве генератора пучковой плазмы. Травление проходило в газах  $\text{Ar}+\text{SF}_6$ ,  $\text{O}_2+\text{SF}_6$ ,  $\text{SF}_6$  за счет распыления ионами пучковой плазмы, энергия которых задавалась ВЧ-генератором.

Авторы [18, 19] показали, что в диапазоне давлений среднего вакуума при инъекции непрерывного электронного пучка внутрь диэлектрической полости энергия ионов, бомбардирующих ее дно, может быть весьма значительна ввиду большой разности потенциалов (сотни – тысячи вольт) между плазмой и этим дном. Размещение на дне такой полости диэлектрической мишени и сканирование ее поверхности электронным пучком обеспечит задание потенциала в локальной области диэлектрика, подверженной воздействию пучка, и соответственно энергии ионам пучковой плазмы, необходимой для распыления поверхности мишени.

В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по влиянию величины энергии электронного пучка на скорость травления поверхности кварцевого стекла.

### Методика и техника эксперимента

В качестве основного инструмента использовался форвакуумный плазменный источник электронов, функционирующий в постоянном режиме, параметры и конструкция которого подробно представлены в [20]. На рис. 1 показана схема эксперимента.

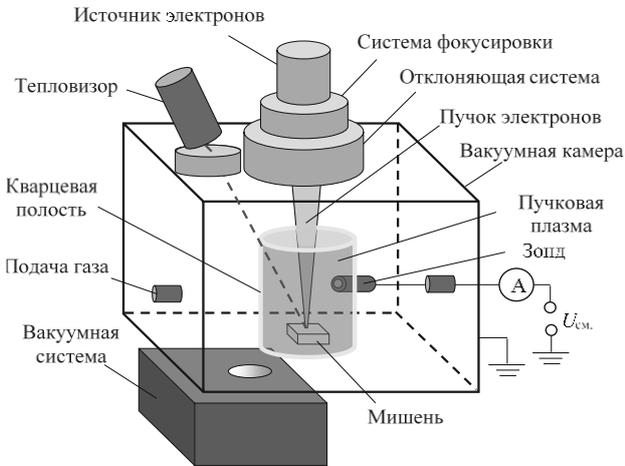


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Вакуумная камера объемом 11 л откачивалась двухступенчатым пластинчато-роторным насосом Vos Edwards E2M80 со скоростью откачки 22,2 л/с, далее вся система промывалась аргоном высокой чистоты (99,998%). Далее при подаче потока рабочего газа (тот же аргон) в вакуумную камеру устанавливалось давление, при котором осуществлялся процесс травления.

Сгенерированный электронный пучок диаметром  $d$  около 2 мм фокусировался магнитной фокусирующей системой и направлялся магнитной отклоняющей системой в кварцевую колбу (внутренний диаметр  $D = 43$  мм, высота  $H = 240$  мм), на дне которой размещался образец кварцевого стекла ( $15 \times 20 \times 4$  мм<sup>3</sup>). Параметры, при которых осуществлялись исследования, подбирались таким образом (табл. 1), чтобы не оказывать существенного теплового воздействия на поверхность кварцевого стекла, а именно – исключить процесс ее плавления или сублимации.

Таблица 1

#### Параметры эксперимента

Параметр	№ образца		
	1	2	3
Остаточное давление, Па	1		
Рабочее давление, Па	2,7		
Ток пучка, мА	15		
Ускоряющее напряжение, кВ	4	6	8
Мощность пучка, Вт	60	90	120
Время травления, ч	3		

Контроль температуры при электронно-лучевом воздействии на поверхность кварцевого стекла реализовывался бесконтактным методом с использованием тепловизора FLUKE 200Ti, позволяющим измерять температуру в диапазоне от  $-20$  до  $+650$  °С с

точностью  $\pm 2$  °С. Преимущество тепловизионного метода перед измерениями, проводимыми оптическим пирометром, заключается в возможности измерения распределения температуры по поверхности всего изделия, а не только в локальной области.

Концентрация пучковой плазмы определялась с использованием зондовой методики. Одиночный зонд Ленгмюра, выполненный из нержавеющей стали с диаметром собирающей поверхности 3 мм, размещался в кварцевой колбе посредством его ввода внутрь через технологическое отверстие на расстоянии 10 см от поверхности мишени.

Анализ состояния поверхности, подверженной воздействию пучка и ионов пучковой плазмы, выполнялся портативным контактным профилометром фирмы «Mahr» – MarSurf PS10, принцип измерения которого заключается в ощупывании индуктивным опорным щупом поверхности. Радиус наконечника щупа – 2 мкм, измерительное усилие 0,75 мН.

### Результаты и обсуждение экспериментальных результатов

На рис. 2 представлены измерения шероховатости поверхности образцов после электронно-ионной обработки локального участка поверхности профилометром.

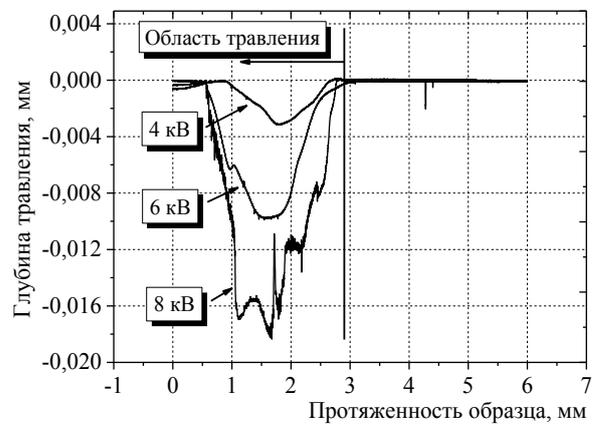


Рис. 2. Профилометрические измерения шероховатости поверхности

Видно, что по мере увеличения энергии электронов пучка увеличивается глубина и, соответственно, скорость травления поверхности кварцевого образца. Это указывает на то, что энергия ионов пучковой плазмы и, соответственно, потенциал мишени, задаваемый пучком, увеличивается с ростом его энергии. Косвенно данное предположение подтверждается визуальной картиной свечения плазмы в колбе (рис. 3). Из рис. 3 видно, что по мере увеличения энергии электронного пучка визуально увеличивается протяженность  $l$  области, отделяющей поверхность мишени от плазмы пучка. Эта область представляет собой так называемый ионный слой, в котором происходит некоторое замедление электронов пучка и ускорение ионов пучковой плазмы.

Мониторинг тепловых полей поверхности образцов показал, что температура образцов в области взаимодействия пучка электронов с поверхностью

не превышает 613 °С при максимальных параметрах эксперимента.

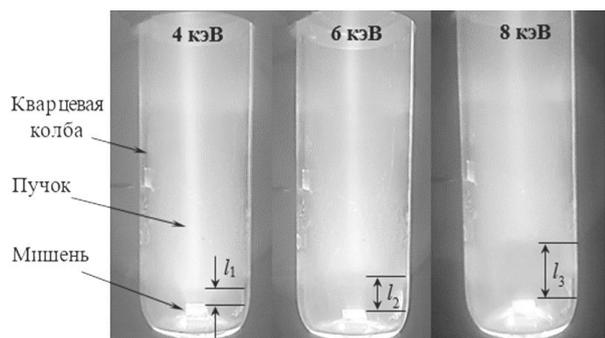


Рис. 3. Свечение пучковой плазмы при различных энергиях пучка

Данное значение значительно меньше температуры плавления (1713–1728 °С) или испарения кварцевого стекла, что указывает на то, что результатом картины шероховатости поверхности, представленной на рис. 2, является именно травление, а не нагрев до плавления или испарения.

Для подтверждения данного предположения проводился следующий эксперимент. Подбирался режим, в котором отсутствовал ионный слой где происходит ускорение ионов из плазмы электронного пучка, что сразу исключало процесс травления поверхности кварца. При этом температура образца составляла 630 °С. На высокоточных весах (погрешность 0,001 г) взвешивался образец до обработки, а затем после обработки электронным пучком. В результате измерений изменение в весе образца находилось на уровне погрешности весов, что свидетельствует об отсутствии уноса материала с поверхности образца при температуре 630 °С. При этом следов травления, плавления или испарения также не обнаружено. Таким образом, если создать условия, в которых формируется ионный слой, ускоряющий ионы до энергии, достаточной для распыления, а температурная нагрузка на поверхность образца диэлектрика не будет превышать 600 °С, то можно будет добиться травления его поверхности.

Выполним анализ полученных результатов по ионному травлению кварца. Прежде всего, обратим внимание, что, судя по рис. 3, придонный ионный слой является достаточно протяженным при всех исследованных энергиях пучка – его ширина  $l$  сравнима с диаметром полости. Это дает основание предполагать достаточно большую разность потенциалов  $\Delta\phi$  между плазмой и облучаемой пучком поверхностью кварцевой мишени (т.е. потенциал мишени). На основании известной формулы [21], используя экспериментально измеренные значения ширины слоя  $l$  и параметров плазмы (концентрации  $n$  и электронной температуры  $T_e$ ), можно оценить величину  $\Delta\phi$ :

$$\Delta\phi = \left[ l(ekT_e)^{1/4} / (\epsilon_0/n)^{1/2} \right]^{4/3}. \quad (1)$$

Результаты оценок представлены в табл. 2.

Таблица 2

Величина потенциала образцов для различных энергий пучка

Энергия пучка, кэВ	Ширина слоя $l$ , см	Концентрация плазмы $n$ , см <sup>-3</sup>	Потенциал мишени $\Delta\phi$ , В
4	0,5	$2,43 \cdot 10^{10}$	490
6	1,5	$2,13 \cdot 10^{10}$	1960
8	2,5	$2,16 \cdot 10^{10}$	3910

Как видно из табл. 2, потенциал кварцевой мишени на дне кварцевой полости может достигать достаточно больших значений, сравнимых с энергией пучка. Судя по рис. 2, ширина профилей травления совпадает с диаметром пучка. Это свидетельствует о том, что электроны пучка являются основной причиной формирования высокого отрицательного потенциала в области «отпечатка пучка» на поверхности мишени. С учетом этого рассчитаем скорости ионного травления кварцевой мишени и сравним их с экспериментальными значениями (т.е. оцененными по рис. 2 с учетом длительности эксперимента 3 ч). Большие протяженности придонных ионных слоев свидетельствуют о пренебрежимо малой вторично-электронной эмиссии с поверхности кварца, поэтому вкладом вторичных электронов в образование плазмы можно пренебречь [22]. Тогда радиальное распределение плотности ионного потока  $j_i(r)$  с поверхности плазмы на мишень будет определяться исключительно распределением плотности тока электронного пучка  $j_b(r)$  и запишется в виде

$$j_i(r) = j_b(r) \sigma_{iAr} (U_a - \Delta\phi) S_b n_g / \pi D, \quad (2)$$

где  $\sigma_{iAr}$  – сечение ионизации атома аргона электронами с энергией, заданной ускоряющим напряжением  $U_a$  и уменьшенной на величину потенциала,  $S_b$  – площадь поперечного сечения пучка в плоскости мишени,  $n_g$  – концентрация газа.

С достаточной степенью точности распределение плотности тока электронного пучка  $j_b(r)$  в пределах его радиуса  $r_b$  можно описать в виде

$$j_b(r) = j_{b0} \left( 1 - r^2/r_b^2 \right), \quad (3)$$

где  $j_{b0}$  – плотность тока пучка на его геометрической оси (при  $r = 0$ ), определяемая из условия нормировки:

$$j_{b0} = \frac{I_b}{\int_0^{r_b} \left( 1 - r^2/r_b^2 \right) 2\pi r dr}, \quad (4)$$

где  $I_b$  – ток электронного пучка, непосредственно измеряемый в эксперименте.

Тогда радиальное распределение скорости ионного травления (в нм/с) кварцевой мишени запишется в виде [23]

$$v(r) = j_i(r) \frac{M_q}{e\rho_q N_a} K_{sp}, \quad (5)$$

где  $M_q$ ,  $\rho_q$  – молярная масса и плотность кварца,  $K_{sp}$  – зависящий от энергии ионов коэффициент ионного распыления, который в рамках данных оценок использовался в качестве параметра.

Сравнение экспериментальных и рассчитанных профилей скорости травления мишени приведено на рис. 4.

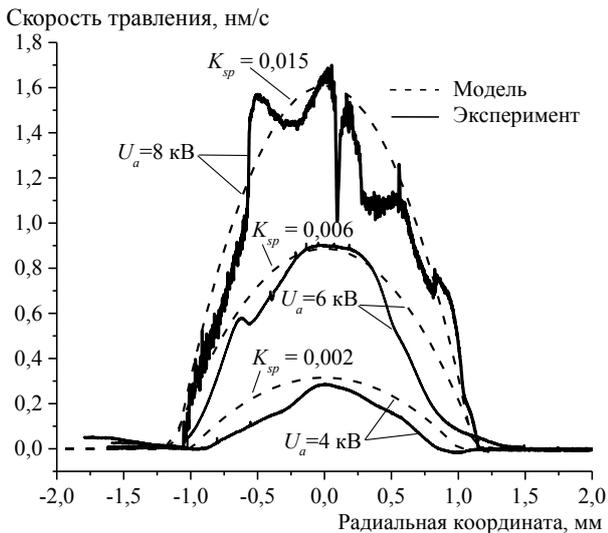


Рис. 4. Экспериментально измеренные (жирные линии) и рассчитанные (пунктирные линии) радиальные распределения скоростей ионного травления кварцевой мишени электронным пучком током 15 мА и энергией 4,6 или 8 кэВ, в кварцевой полости при давлении аргона 4 Па

Из рис. 4 видно, что расчетные распределения скоростей распыления удовлетворительно соответствуют экспериментальным. Отметим, что для всех трех энергий пучка коэффициенты распыления оказались много меньше единицы. Скорее всего это связано с тем, что несмотря на довольно большое падение напряжения в придонном ионном слое (см. табл. 2), его протяженности  $l$  все же не хватает для того, чтобы ионы набрали значительную энергию для эффективного распыления мишени. Именно поэтому в этих условиях определяющий вклад в установление скорости травления вносит в основном плотность ионного потока, а не энергия ионов, и, следовательно, максимум скорости распыления совпадает с максимумом плотности ионного потока на оси пучка (рис. 5). Немонотонный характер экспериментальной кривой для  $U_a = 8$  кВ объясняется, скорее всего, нарушением симметричности профиля пучка при высоких ускоряющих напряжениях вследствие деформации плазменной эмиссионной границы в форвакуумном источнике электронов.

#### Заключение

Продемонстрирована возможность ионного травления диэлектрика (кварца) при его размещении на дне диэлектрической полости и облучении непрерывным электронным пучком в форвакуумной области давлений. Профили травления в этом случае будут определяться профилем плотности тока электронного пучка. Достигнуты скорости ионного травления кварца в максимуме профилей от 0,3 до 1,6 нм/с в зависимости от энергии пучка.

Работы по модернизации системы фокусировки и системы отклонения электронного пучка поддержаны грантом Министерства науки и высшего обра-

зования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2020-0038. Работы по осуществлению травления кварца, измерению параметров пучковой плазмы и численному моделированию выполнены при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 19-48-703002 р\_мол\_а.

#### Литература

1. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies / L.E. Murr, S.M. Gaytan, D.A. Ramirez, E. Martinez, J. Hernandez, K.N. Amato, P.W. Shindo, F.R. Medina, R.B. Wicker // Journal of Materials Science and Technology. – 2012. – Vol. 28, No. 1. – P. 1–14.
2. Hohn F.J. Electron beam lithography: its applications // Journal of Vacuum Science and Technology B (Microelectronics Processing and Phenomena). – 1989. – Vol. 7, No. 6. – P. 1405–1411.
3. Кайдалов А.А. Сварочные электронные пушки / А.А. Кайдалов, Е.И. Истомин. – Киев: Научно-технический комплекс «Институт электросварки им. Е.О. Патона» Национальной академии наук Украины, 2003. – 153 с.
4. Молоковский С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 303 с.
5. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. – М.: Советское радио, 1966. – 455 с.
6. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
7. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 212 с.
8. Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1977. – 145 с.
9. Generation of electron-beam produced plasmas and applications to surface modification / D. Leonhardt, C. Muratore, S.G. Walton, D.D. Blackwell, R.F. Fernsler, R.A. Meger // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 177–178, No. 30. – P. 682–687.
10. Abraha P. Surface modification of steel surfaces by electron beam excited plasma processing / P. Abraha, Y. Yoshikawa, Y. Katayama // Vacuum. – 2009. – Vol. 83. – P. 497–500.
11. Low-temperature nitriding of stainless steel in an electron beam generated plasma / C. Muratore, D. Leonhardt, S.G. Walton, D.D. Blackwell, R.F. Fernsler, R.A. Meger // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 191. – P. 255–262.
12. Nitriding of titanium in electron beam excited plasma in medium vacuum / A.V. Tyunkov, D.A. Golosov, D.B. Zolotukhin, A.V. Nikonenko, E.M. Oks, Y.G. Yushkov, E.V. Yakovlev // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 383. – P. 125241.
13. Gavrilov N.V. Effect of the electron beam and ion flux parameters on the rate of plasma nitriding of an austenitic stainless steel / N.V. Gavrilov, A.I. Men'shakov // Technical Physics. – 2012. – Vol. 57, No. 3. – P. 399–404.
14. On the formation of nanocomposite TiC/a-C:H coatings by the method of the magnetron sputtering of Ti in an electron-beam activated Ar/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> mixture / N.V. Gavrilov, A.S. Kamenetskikh, A.A. Komarskiy, A.M. Murzakaev, A.V. Chukin // Journal of Surface Investigation. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 846–852.

15. Etching with electron beam generated plasmas / D. Leonhardt, S.G. Walton, C. Muratore, R.F. Fernsler, R.A. Meger // *Journal of Vacuum Science and Technology A. Vacuum Surfaces and Films.* – 2004. – Vol. 22, No. 6. – P. 2276–2283.

16. Ceramic coating deposition by electron beam evaporation / E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Y.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin // *Surface and Coatings Technology.* – 2017. – Vol. 325. – P. 1–6.

17. Deposition of boron-containing coatings by electron-beam evaporation of boron-containing targets / Y.G. Yushkov, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, C. Corbella, D.B. Zolotukhin // *Ceramics International.* – 2020. – Vol. 46, No. 4. – P. 4519–4525.

18. Zolotukhin D.B. On the role of secondary electrons in beam plasma generation inside a dielectric flask by forevacuum plasma cathode electron source / D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // *Physics of Plasmas.* – 2017. – Vol. 24, No. 9. – P. 093502.

19. Zolotukhin D.B. Generation of uniform electron beam plasma in a dielectric flask at forevacuum pressures / D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // *Plasma Sources Science and Technology.* – 2016. – Vol. 25, No. 1. – P. 015001.

20. Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum / V.A. Burdovitsin, D.A. Golosov, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Y.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin, S.M. Zavadsky // *Surface and Coatings Technology.* – 2019. – Vol. 358. – P. 726–731.

21. Lieberman M.A. Fundamental of plasmas and sheaths. Chapter 2 in book: *Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition* / Editor A. Anders. – Wiley and Sons, 2000. – 14 p.

22. On the connection between secondary electron emission yield and the potential of an electron-beam-irradiated target / V.A. Burdovitsin, D.B. Zolotukhin, E.M. Oks, N.A. Panchenko // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2019. – Vol. 52. – P. 285204.

23. Behrisch R. *Sputtering by Particle bombardment.* Solid State Physics Spectroscopy and Microscopy. – Berlin. Heidelberg: Springer, 1981. – 284 p.

#### Тюньков Андрей Владимирович

Канд. техн. наук, с.н.с., доцент каф. физики  
Томского государственного ун-та систем управления  
и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-9742-9636  
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69  
Эл. почта: tyunkov84@mail.ru

#### Золотухин Денис Борисович

Канд. физ.-мат. наук, с.н.с., доцент каф. физики ТУСУРА  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-5206-9486  
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69  
Эл. почта: zolotukhinden@gmail.com

#### Юшков Георгий Юрьевич

Доктор. техн. наук, в.н.с., доцент каф. физики ТУСУРА  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-5762-2463  
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69  
Эл. почта: yushkovyu@mail.ru

#### Казаков Андрей Викторович

Канд. техн. наук, н.с., доцент каф. физики ТУСУРА  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69  
Эл. почта: andrykazakov@gmail.com

Tyunkov A.V., Zolotukhin D.B.,  
Yushkov Yu.G., Kazakov A.V.

#### Ion-plasma etching initiated by the appearance of a beam

The etching of quartz sample by the flow of energetic ions from the beam plasma produced by continuous electron beam injected in a dielectric cavity in argon in medium vacuum (2.7 Pa) was demonstrated. The energy of bombarding ions was adjusted by the voltage drop on a sheath between a plasma boundary and the cavity bottom charging by the electron beam, so the beam was the only source of generating ions and adjusting their energy. It was found that the etching rate grows with the electron beam energy following the increase in the absolute value of the near-bottom voltage drop.

**Keywords:** dielectrics etching, beam-produced plasma, plasma-cathode electron source, medium vacuum.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-79-84

#### References

1. Murr L.E., Gaytan S.M., Ramirez D.A., Martinez E., Hernandez J., Amato K.N., Shindo P.W., Medina F.R., Wicker R.B. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science and Technology*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 1–14.

2. Hohn F.J. Electron beam lithography: its applications. *Journal of Vacuum Science and Technology B (Microelectronics Processing and Phenomena)*, 1989, vol. 7, no. 6, pp. 1405–1411.

3. Kaydalov A.A., Istomin E.I. *Svarochnie electronnie pushki* [Welding guns]. Kiev, Scientific and technical complex «Institute of Electric Welding named after. E.O. Paton National Academy of Sciences of Ukraine», 2003. 153 p. (in Russ.).

4. Molokovskiy S.I., Sushkov A.D. *Intensivnie electronnie i ionnie puchki* [Intense electron and ion beams]. M., Energoatomizdat, 1991. 303 p. (in Russ.).

5. Alyamovskiy I.V. *Electronnie puchki i electronnie pushki* [Electron beams and electron guns], M., Sovetskoe radio, 1966. 455 p. (in Russ.).

6. Novikov A.A. *Istochniki electronov visokovoltного tleyuschego razryada s anodnoy plasmoy* [Electron sources of a high-voltage glow discharge with anode plasma]. M., Energoatomizdat, 1983. 96 p. (in Russ.).

7. Zavyalov M.A., Kreyndel Yu.E., Novikov A.A., Shanturin L.P. *Plasmennye processy v tehnologicheskikh electronnikh pushkakh* [Plasma processes in technological electron guns]. M., Energoatomizdat, 1989. 212 p. (in Russ.).

8. Kreyndel Yu.E. *Plasmennye istochniki electronov* [Plasma sources of electrons]. M., Atomizdat, 1977. 145 p. (in Russ.).

9. Leonhardt D., Muratore C., Walton S.G., Blackwell D.D., Fernsler R.F., Meger R.A. Generation of electron-beam produced plasmas and applications to surface modification. *Surface and Coatings Technology*, 2004. vol. 177–178, no. 30, pp. 682–687.

10. Abraha P., Yoshikawa Y., Katayama Y. Surface modification of steel surfaces by electron beam excited plasma processing. *Vacuum*, 2009. vol. 83, pp. 497–500.

11. Muratore C., Leonhardt D., Walton S.G., Blackwell D.D., Fernsler R.F., Meger R.A. Low-temperature nitrid-

ing of stainless steel in an electron beam generated plasma. *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 191, pp. 255–262.

12. Tyunkov A.V., Golosov D.A., Zolotukhin D.B., Nikonenko A.V., Oks E.M., Yushkov Y.G., Yakovlev E.V. Nitriding of titanium in electron beam excited plasma in medium vacuum. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 383, pp. 125241.

13. Gavrilov N.V., Men'shakov A.I. Effect of the electron beam and ion flux parameters on the rate of plasma nitriding of an austenitic stainless steel. *Technical Physics*, 2012, vol. 57, no. 3, pp. 399–404.

14. Gavrilov N.V., Kamenetskikh A.S., Komarskiy A.A., Murzakaev A.M., Chukin A.V. On the formation of nanocomposite TiC/a-C:H coatings by the method of the magnetron sputtering of Ti in an electron-beam activated Ar/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> mixture. *Journal of Surface Investigation*, 2014, vol. 8, no. 5, pp. 846–852.

15. Leonhardt D., Walton S.G., Muratore C., Fernsler R.F., Meger R.A. Etching with electron beam generated plasmas. *Journal of Vacuum Science and Technology A. Vacuum Surfaces and Films*, 2004, vol. 22, no. 6, pp. 2276–2283.

16. Oks E.M., Tyunkov A.V., Yushkov Y.G., Zolotukhin D.B. Ceramic coating deposition by electron beam evaporation. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 325, pp. 1–6.

17. Yushkov Y.G., Oks E.M., Tyunkov A.V., Corbella C., Zolotukhin D.B. Deposition of boron-containing coatings by electron-beam evaporation of boron-containing targets. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, no. 4, pp. 4519–4525.

18. Zolotukhin D.B., Burdovitsin V.A., Oks E.M. On the role of secondary electrons in beam plasma generation inside a dielectric flask by fore-vacuum plasma cathode electron source. *Physics of Plasmas*, 2017, vol. 24, no. 9, pp. 093502.

19. Zolotukhin D.B., Burdovitsin V.A., Oks E.M. Generation of uniform electron beam plasma in a dielectric flask at forevacuum pressures. *Plasma Sources Science and Technology*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 015001.

20. Burdovitsin V.A., Golosov D.A., Oks E.M., Tyunkov A.V., Yushkov Y.G., Zolotukhin D.B., Zavadsky S.M. Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 358, pp. 726–731.

21. Lieberman M.A. *Fundamental of plasmas and sheaths. Chapter 2 in book: Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition, Editor A. Anders.* Wiley and Sons, 2000. 14 p.

22. Burdovitsin V.A., Zolotukhin D.B., Oks E.M., Panchenko N.A. On the connection between secondary electron emission yield and the potential of an electron-beam-irradiated target. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, vol. 52, pp. 285204.

23. Behrisch R. *Sputtering by Particle bombardment. Solid State Physics Spectroscopy and Microscopy.* Berlin. Heidelberg, Springer, 1981. 284 p.

---

#### **Andrey V. Tyunkov**

Candidate of Science in Engineering, Assistant Professor, Department of Physics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-9742-9636  
Phone: +7 (382-2) 41-33-69  
Email: tyunkov84@mail.ru

#### **Denis B. Zolotukhin**

Candidate of Science in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Department of Physics, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-5206-9486  
Phone: +7 (382-2) 41-33-69  
Email: zolotukhinden@gmail.com

#### **Yury G. Yushkov**

Doctor of Science in Engineering, Assistant Professor, Department of Physics, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-5762-2463  
Phone: +7 (382-2) 41-33-69  
Email: yushkovyu@mail.ru

#### **Andrey V. Kazakov**

Candidate of Science in Engineering Sciences, Assistant Professor, Department of Physics, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-33-69  
Email: andrykazakov@gmail.com

УДК 537.533.9

В.Т. Чан, А.С. Климов, А.А. Зенин

## Формирование покрытий на основе $Al_2O_3$ на полипропилене электронно-лучевым методом в форвакуумной области давлений

Представлены результаты использования электронного пучка для испарения и нанесения керамических покрытий на полипропилен. В качестве испаряемого материала использовали керамику на основе  $Al_2O_3$ . Для генерации электронного пучка применялся форвакуумный плазменный электронный источник, необходимость использования которого обусловлена высокой эффективностью при обработке диэлектриков. Показано, что при нанесении покрытий таким методом на материалы с низкой теплостойкостью необходим точный контроль времени и скорости испарения керамики. Определены оптимальные режимы нанесения покрытий, при которых температура полимера не поднимется выше  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . Даны фотографии нанесенных покрытий, где отражены их оптические и поверхностные свойства.

**Ключевые слова:** оксид алюминия, покрытия, электронно-лучевое испарение, полипропилен, коэффициент пропускания.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-85-89

Полимеры находят применение в различных отраслях промышленности и быту. Благодаря оптимальному соотношению между массой и прочностными свойствами полимеры все чаще вытесняют металлы и их сплавы в таких отраслях промышленности, как авиационная, автомобильная, космическая и др. [1, 2]. Полимеры применяются и в микроэлектронике [3]. Так, при изготовлении сепараторов в литий-ионных аккумуляторных батареях встает вопрос об обеспечении температуростойкости полипропиленовых мембран, используемых в качестве разделителей. Такие разделители предотвращают физический контакт положительного и отрицательного электродов, обеспечивая при этом свободный перенос ионов внутри элемента [4]. Защитные покрытия на полимерах позволяют снизить их нагрев и повысить механическую прочность [5, 6].

Для пищевой промышленности полимерные материалы прочно закрепились как упаковочный материал, не вступающий во взаимодействие с продуктами и защищающий их от воздействия окружающей среды, в частности, попадания влаги и кислорода, а также ультрафиолетового излучения [7]. Для защиты от ультрафиолетового облучения полимерные пленки, как правило, покрывают тонким слоем алюминия, который не пропускает излучение, однако обладает недостатками. К недостаткам можно отнести отсутствие видимости продукта и невозможность использования в микроволновой печи.

Устранение таких недостатков возможно при использовании в качестве барьерного покрытия оксида алюминия (обычно называемого  $AlO_x$ , поскольку точная стехиометрия обычно не измеряется). При нанесении таких покрытий на полимеры обеспечивается видимость продукта при сохранении барьерных свойств. Для получения покрытий используется метод вакуумного осаждения (pvd), при котором испаряется алюминий в атмосфере кислорода [8]. Скорость роста покрытия остается достаточно низкой. Альтернативным методом получения покрытий на основе оксида алюминия может являться метод

электронно-лучевого испарения и осаждения из паровой фазы в форвакуумной области давлений [9]. При таком рабочем давлении в  $10\text{--}50\text{ Па}$  на пути транспортировки электронного пучка до мишени образуется плотная плазма. Ионы из такой плазмы нейтрализуют отрицательный заряд, приносимый электронами пучка на облучаемую поверхность диэлектрика [10]. Скорость испарения материала достигает  $0,4\text{ г/мин}$ .

Электронные пушки, способные функционировать при таких давлениях, успешно применяются для различной обработки керамики – такие как сварка, спекание, испарение и нанесение покрытий на металлы и сплавы [11, 12]. Сложность работы с полимерными подложками в их низкой термостойкости, в связи с чем возникают проблемы при расположении их вблизи нагреваемой до высокой температуры керамической мишени. В настоящей работе исследована возможность использования электронно-лучевого метода для нанесения барьерного покрытия из оксида алюминия на полипропилен.

### Материалы и схема эксперимента

В качестве материала подложки использовались пластинки полипропилена в виде квадрата с размерами  $20\times 20\text{ мм}$  и толщиной  $1\text{ мм}$ . Подложки предварительно промывались в ультразвуковой ванне и очищались спиртом.

Мишень для получения оксида алюминия представляла собой паллету из алюмооксидной керамики диаметром  $10\text{ мм}$  и высотой  $4\text{ мм}$ . Элементный состав мишени и ее электрофизические данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы электронно-лучевой обработки

№ образца	Время обработки	Температура керамики
1	30 с	2 200 $^\circ\text{C}$
2	60 с	
3	90 с	
4	30 с	2 300 $^\circ\text{C}$
5	60 с	
6	90 с	
7	Без обработки	

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Установка включает вакуумную камеру с системой откачки, плазменный источник электронов на основе разряда с полым катодом, систему установки мишени и подложек, а также диагностическое оборудование. В работе использован форвакуумный плазменный электронный источник, специальная конструкция которого позволяет ему работать в условиях среднего вакуума.

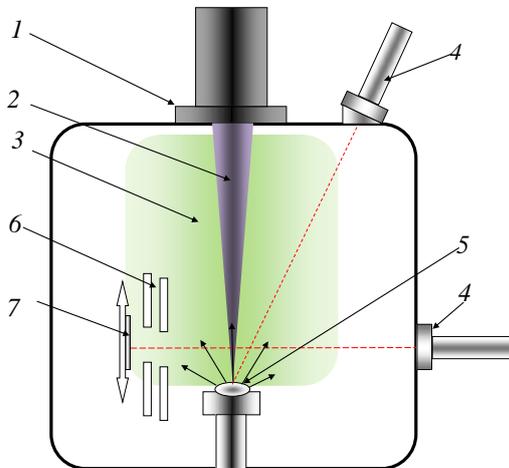


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
1 – плазменный электронный источник, 2 – электронный пучок, 3 – пучковая плазма, 4 – пирометр, 5 – мишень, 6 – теплозащитный экран, 7 – полипропилен

Источник формировал сфокусированный электронный пучок диаметром 1 мм и плотностью мощности до  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Для равномерного нагрева мишени использовалась развертка пучка по квадрату, сторона которого подбиралась меньше диаметра испаряемой мишени. Мишень устанавливалась в графитовый тигель, расположенный на расстоянии 30 см от источника электронов на оси пучка. Нагрев керамической мишени осуществлялся в течение 5–8 мин расфокусированным электронным пучком. Температура, до которой нагревалась мишень, составляла 2 200–2 300 °С. При превышении температуры в 2400 °С керамика кипела с образованием большого количества крупной капельной фракции. Размеры капель достигали 1 мм.

Полипропиленовые подложки закреплялись вертикально на держателях, которые, в свою очередь, располагались на устройстве перемещения. Устройство перемещения позволяло переместить подложки ближе или дальше от испаряемой мишени. Для защиты подложек от перегрева в процессе нагрева керамической мишени до температуры испарения использовались защитные тепловые экраны. При температуре мишени 2400 °С температура за экранами не поднималась выше 30 °С. До достижения требуемой температуры подложки располагались на устройстве перемещения и на расстоянии 25 см от мишени за тепловыми экранами. При достижении требуемой температуры испарения подложки перемещались на расстояние 7 см к мишени поочередно.

Для измерения температуры мишени и полипропиленовых подложек использовались инфракрасные пирометры RAYTEK 1MН (Raytek Corp., Santa Cruz, CA, USA) с диапазоном измерений 550–3 000 °С и с диапазоном измерений 50–800 °С соответственно. Расположение пирометров показано на рис. 1. Время нанесения покрытий на подложки полипропилена составляло 30, 60 и 90 с. Режимы напыления для каждого образца представлены в табл. 1.

Для исследования зависимости коэффициента пропускания образцов полимера от длины волны излучения был использован спектрофотометр Genesys 2 фирмы «Thermo Spectronic» с рабочим диапазоном длин волн 200–1100 нм. Гидрофильные свойства поверхности исследовались методом лежащей капли. Выбор такого метода обусловлен относительной легкостью, с которой угол контакта может быть измерен на подходящих подготовленных твердых поверхностях [14]. Контактный угол определяется через 1–2 мин после нанесения капли геометрическим методом по высоте  $h$  и радиусу  $r$  капли в предположении сферической модели ее формы [15].

#### Результаты и дискуссия

Напыление покрытий электронно-лучевым методом, при котором электронный пучок используется в качестве источника тепла, сопряжено с соблюдением двух взаимоисключающих условий. С одной стороны, высокая скорость нанесения покрытий требует большой температуры на поверхности мишени. С другой стороны, полимер обладает низкой температуростойкостью [16] и расположение его вблизи источника тепла может привести к его деградации при нагреве более 95 °С в случае использования полипропилена, например.

Как и следовало ожидать, температура полипропиленовой подложки в процессе испарения керамической мишени повышается. Скорость повышения температуры зависит от температуры мишени и расстояния от подложки до мишени. Основным механизмом передачи тепла от мишени к подложке в условиях хоть и не высокого, но вакуума – это тепловое излучение. Принимая источник и теплового излучения точечным и равномерное распределение теплового излучения во все стороны, могут быть даны простые оценки температуры мишеней. Поскольку процесс нагрева керамики и нанесения покрытий происходит в вакууме, то теплопередачей за счет конвекции можно пренебречь. Расчет нагрева подложки осуществлялся лишь с учетом теплового излучения. Были проведены расчёты по нахождению зависимости температуры полипропилена от времени, расстояния между керамикой и полипропиленом, температуры керамики.

Энергия теплового излучения с поверхности мишени равна

$$Q_{\text{изл}} = \alpha \cdot \sigma \cdot T_K^4 \cdot S_K \cdot t, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{изл}}$  – энергия теплового излучения, Дж;  $\alpha$  – поглощательная способность, равная 0,8 для керамики;

$T_k$  – температура керамики, К;  $S_k$  – площадь керамики,  $m^2$ ;  $t$  – время нанесения покрытия, с.

В предположении того, что тепловая энергия излучается во все стороны от нагретой мишени, энергия излучения, попадающая на поверхность полимера, рассчитывалась пропорциональной отношению площади полимера к площади сферы радиусом, равным расстоянию от полимера до мишени из керамики:

$$Q_{\text{погл}} = Q_{\text{изл}} \cdot \frac{S_p}{4\pi \cdot l^2}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{погл}}$  – теплота поглощения;  $S_p$  – площадь полимера,  $m^2$ ;  $l$  – расстояние между образцом керамики и подложкой полимера, м;  $m_p$  – масса полимера, кг;  $C_p$  – теплоёмкость полипропилена, Дж/кг·К;  $\Delta T_p$  – температура полимера, К.

Пренебрежем теплопроводом через держатель полимерной подложки ввиду низкой теплопроводности полимера. Тогда можно считать, что вся полученная за счет теплового излучения энергия идет на нагрев полимера

$$Q_{\text{тепл}} = m_p \cdot C_p \cdot \Delta T_p. \quad (3)$$

Приравняв энергию теплового излучения, полученную от керамики (4), к энергии, затраченной на нагрев полимера (3), найдем температуру полимера

$$\Delta T_p(t, T_k, l) = \frac{\alpha \cdot \sigma \cdot S_p \cdot S_k \cdot T_k^4 \cdot t}{m_p \cdot C_p \cdot 4\pi \cdot l^2}. \quad (4)$$

Исходные данные, необходимые для расчётов (характеристики полипропилена ГОСТ 26996–86, параметры и температура керамики, поглощательная способность и энергетическая светимость), представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные						
$C_p$ , Дж/кг·К	$S_p$ , $mm^2$	$m_p$ , г	$T_k$ , К	$S_k$ , $mm^2$	$\sigma$ , Дж/с· $m^2$ ·К <sup>4</sup>	$\alpha$
1930	80	7,2	2473	20	$5,67 \cdot 10^{-8}$	0,8
			2573			

Такие оценки показали, что при расстоянии от мишени до подложки более 10 см температура подложки может повышаться до критической в 95 °С в течение времени порядка полутора минут (рис. 2), чего может быть достаточно для формирования покрытия.

Экспериментально измеренная температура подложек, расположенных на расстоянии 10 см от мишени, в зависимости от температуры мишени показана на рис. 3.

Как видно, рост температуры происходит линейно, превышение 95 °С наблюдается только при длительности нагрева мишени порядка 75 с и ее температуре 2 400 °С. Скорость нагрева подложек составила от 0,4 до 0,8 °С/с.

Для получения покрытий был выбран режим с температурой мишени 2 300 °С, поскольку при температуре 2 400 °С наблюдалось интенсивное кипение керамики и образование капельной фракции, что не

могло привести к снижению качества покрытия. Время испарения было задано от 30 до 90 с. На всех полученных подложках было сформировано тонкое покрытие, поскольку время нанесения его все же оказалось недостаточным для формирования покрытия с толщиной более 0,1 мкм. Фотография покрытия и часть подложки без него представлены на рис. 4.

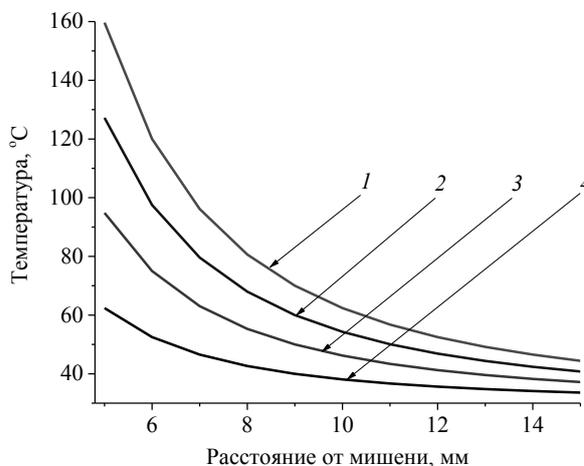


Рис. 2. Зависимость температуры полипропилена от расстояния между подложкой и полимером. Температура керамики 2 300 °С, время напыления: 1 – 120 с, 2 – 90 с, 3 – 60 с, 4 – 30 с

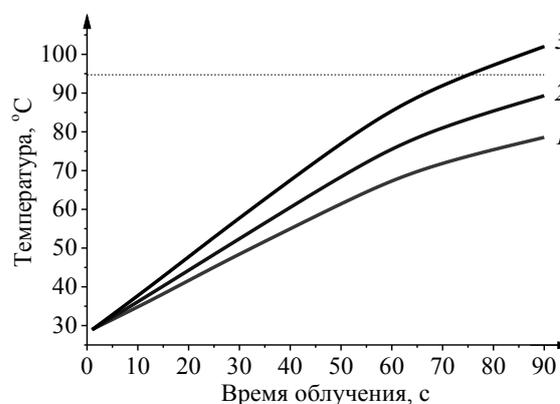


Рис. 3. Температура подложек в зависимости от времени и температуры мишени: 1 – 2 200 °С, 2 – 2 300 °С, 3 – 2 400 °С

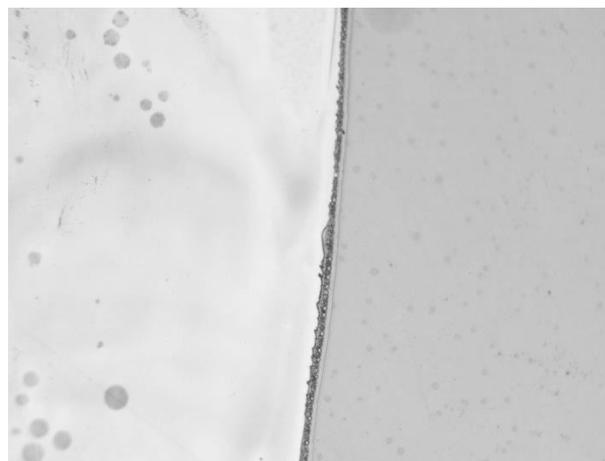


Рис. 4. Покрытие (справа) на основе оксида алюминия на подложке из полипропилена (слева)

Адгезионные свойства покрытия детально не исследовались, но сформированное покрытие не отслаивалось при ручных манипуляциях.

Исследование оптических свойств покрытий представлено на основе измерения коэффициента пропускания света. На рис. 5 представлены зависимости коэффициента пропускания от длины волны света для подложек с покрытием, полученным при различном времени нанесения.

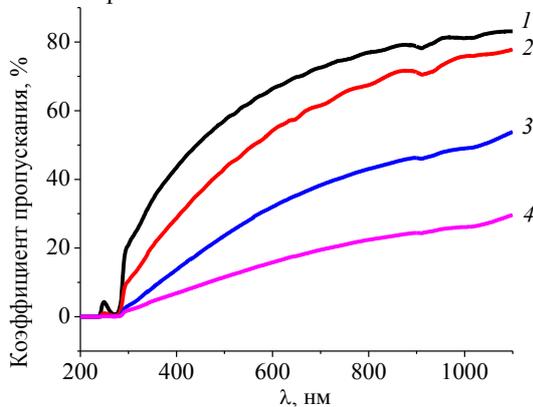


Рис. 5. Коэффициент пропускания исходного образца 1 и в зависимости времени нанесения покрытия: 2 – 30 с, 3 – 60 с, 4 – 90 с

Как видно, коэффициент пропускания оказался существенно зависящим от времени нанесения покрытия. Причем уменьшение коэффициента пропускания света наблюдается во всем диапазоне видимого света. Для границы ультрафиолетового спектра 380 нм уменьшение коэффициента пропускания составляет более чем 6 раз, что позволяет говорить о наличии защитных свойств такого рода покрытий.

#### Заключение

Электронно-лучевое испарение керамической мишени в области форвакуумного давления позволяет наносить керамические покрытия на полимерные материалы. Температура подложки во время электронно-лучевого осаждения керамического покрытия существенно зависит от времени осаждения. Скорость повышения температуры достигает  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , что необходимо учитывать при данном способе нанесения покрытия. Было обнаружено, что с повышением температуры керамики коэффициент пропускания полимера с керамическим покрытием уменьшается, следовательно, свойства упаковки, изготовленной из такого материала для пищевой промышленности, улучшаются, и упаковка будет меньше подвергаться воздействию ультрафиолетового излучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90184, модернизация электронного источника осуществлялась за счет гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – докторов наук, проект № МД-754.2021.4.

#### Литература

1. Galindo T.G.P. Hydroxyapatite Nanoparticle Coating on Polymer for Constructing Effective Biointeractive Interfaces / T.G.P. Galindo, Y. Chai, M. Tagaya // *Journal of Nanomaterials*. – 2019. – Vol. 3. – P. 1–23.

2. Fotovvati B. On Coating Techniques for Surface Protection: A Review / B. Fotovvati, N. Namdari, A. Dehghanghadikolaei // *Journal of Manufacturing and Materials processing*. – 2019. – Vol. 3, Iss. 1. – P. 28.

3. Prasher R. Thermal Interface Materials: Historical Perspective, Status, and Future Directions / *Proceedings of the IEEE*. – 2006. – Vol. 94, Iss. 8. – P. 1571–1586.

4. Effect of a thin ceramic-coating layer on thermal and electrochemical properties of polyethylene separator for lithium-ion batterie / S. Chuan, Zh. Peng, Ch. Lixiao, Y. Pingting, Zh. Jinbao // *Journal of Power Sources*. – 2014. – Vol. 270. – P. 547–553.

5. Venkatesh N. A Study of Bio-Active Coating of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Egg and Sea Shell Powder On Pvc, Teflon, And Polyurethane / N. Venkatesh, H.G. Hanumantharaju // *Material Today*. – 2017. – Vol. 5, Iss. 5. – P. 13392–13399.

6. Thermal barrier coatings – a state of the art review / J.G. Thakare, C. Pandey, M.M. Mahapatra, R.S. Mulik // *Metals and Materials International*. – 2021. – Vol. 27, Iss. 7. – P. 1947–1968.

7. Sun G. A Study on the Deposition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings on Polymer Substrates by a Plasma Spray/Micro-Arc Oxidation Two-Step Method / G. Sun, X. He, J.A. Jiang // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2013. – Vol. 22. – P. 27–35.

8. Struller C.F. Aluminum oxide barrier coatings on polymer films for food packaging applications / C.F. Struller, P.J. Kelly, N.J. Copeland // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 241. – P. 130–137.

9. Electron-beam deposition of heat-conducting ceramic coatings in the forevacuum pressure range / Yu.G. Yushkov, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, D.B. Zolotukhin, A.Yu. Y ushenko, A.Yu. Yushkov // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46, Iss. 13. – P. 21190–21195.

10. Specific features of the charge neutralization of silicon carbide in sintering by electron beam in the forevacuum range of pressures / A.S. Klimov, V.A. Burdovitsin, A.A. Zenin, E.M. Oks, O.L. Khasanov, E.S. Dvilis, A.O. Khasanov // *Technical Physics Letters*. – 2015. – Vol. 41, Iss. 8. – P. 747–749.

11. Generation of high-power-density electron beams by a forevacuum-pressure plasma-cathode electron source / Yu.I. Bakeev, A.S. Klimov, E.M. Oks, A.A. Zenin // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2018. – Vol. 27, Iss. 7. – P. 075002.

12. Formation of Gradient Metalloceramic Materials Using Electron-Beam Irradiation in the Forevacuum / A.S. Klimov, A.A. Zenin, I.Yu. Bakeev, E.M. Oks // *Russian Physics Journal*. – 2019. – Vol. 62, Iss. 8. – P. 1–7.

13. Forevacuum plasma source of continuous electron beam / A. Klimov, I. Bakeev, E. Oks, A. Zenin // *Laser and Particle Beams*. – 2019. – Vol. 37 (2). – P. 203–208.

14. Zielecka M. Methods of contact angle measurements as a tool for characterization of wettability of polymers // *Polymer*. – 2004. – Vol. 49, No. 5. – P. 327–332.

15. Kwok D. Contact angle measurement and contact angle interpretation / D. Kwok, A.W. Neumann // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 1999. – Vol. 81. – P. 167–249.

16. Maddah H. A. Polypropylene as a promising plastic: A review // *American Journal of Polymer Science*. – 2016. – Vol. 6(1). – P. 1–11.

#### Чан Ван Ту

Аспирант каф. физики

Томского государственного университета

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

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

Тел.: +7-960-975-48-69

Эл. почта: tranvantu0208@gmail.com

**Климов Александр Сергеевич**

Д-р техн. наук, профессор каф. физики ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-905-990-52-41  
Эл. почта: klimov@main.tusur.ru

**Зенин Алексей Александрович**

Канд. техн. наук, доцент каф. физики ТУСУРа  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69  
Эл. почта: zenin1988@gmail.com

Tran V.T., Klimov A.S., Zenin A.A.

### **Formation of Coatings Based on $Al_2O_3$ on Polypropylene by the Electron-Beam Method in the Forevacuum Pressure Region**

The article presents the results of using an electron beam for evaporation and deposition of ceramic coatings on polypropylene. Ceramics based on  $Al_2O_3$  was used as the evaporated material. To generate an electron beam, a forevacuum plasma electron source was used, the need for which is due to its high efficiency in the processing of dielectrics. It has been shown that when creating coatings by this method on materials with low heat resistance, it is necessary to accurately control the time and rate of evaporation of ceramics. The optimal modes of coating deposition were determined, under which the temperature of the polymer does not rise above 80 °C. Photographs of applied coatings, their optical and surface properties are presented.

**Keywords:** ceramic coatings, plasma treatment, polymer, electron beam, heating temperature.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-85-89

#### *References*

- Galindo T.G.P., Chai Y., Tagaya M. Hydroxyapatite Nanoparticle Coating on Polymer for Constructing Effective Biointeractive Interfaces. *Journal of Nanomaterials*, 2019, vol. 3, pp. 1–23.
- Fotovvati B., Namdari N., Dehghanhadikolaei A. On Coating Techniques for Surface Protection: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3, iss. 1, p. 28.
- Prasher R. Thermal Interface Materials: Historical Perspective, Status, and Future Directions. *Proceedings of the IEEE*, 2006, vol. 94, iss. 8, pp. 1571–1586.
- Chuan S., Peng Zh., Lixiao Ch., Pingting Y., Jinbao Zh. Effect of a thin ceramic-coating layer on thermal and electrochemical properties of polyethylene separator for lithium-ion batterie. *Journal of Power Sources*, 2014, vol. 270, pp. 547–553.
- Venkatesh N., Hanumantharaju H.G. A Study of Bio-Active Coating of  $Al_2O_3$ , Egg and Sea Shell Powder On Pvc, Teflon, and Polyurethane. *Material Today*, 2017, vol. 5, iss. 5, pp. 13392–13399.
- Thakare J.G., Pandey C., Mahapatra M.M., Mulik R.S. Thermal barrier coatings – a state of the art review. *Metals and Materials International*, 2021, vol. 27, iss. 7, pp. 1947–1968.
- Sun G., He X., Jiang J.A. A Study on the Deposition of  $Al_2O_3$  Coatings on Polymer Substrates by a Plasma

Spray/Micro-Arc Oxidation Two-Step Method. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, vol. 22, pp. 27–35.

8. Struller C.F., Kelly P.J., Copeland N.J. Aluminum oxide barrier coatings on polymer films for food packaging applications. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 241, pp. 130–137.

9. Yushkov Yu.G., Oks E.M., Tyunkov A.V., Zolotukhin D.B., Y ushenko A.Yu., Yushkov A.Yu. Electron-beam deposition of heat-conducting ceramic coatings in the forevacuum pressure range. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, iss. 13, pp. 21190–21195.

10. Klimov A.S., Burdovitsin V.A., Zenin A.A., Oks E.M., Khasanov O.L., Dvilis E.S., Khasanov A.O. Specific features of the charge neutralization of silicon carbide in sintering by electron beam in the forevacuum range of pressures. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, iss. 8, pp. 747–749.

11. Bakeev Yu.I., Klimov A.S., Oks E.M., Zenin A.A. Generation of high-power-density electron beams by a forevacuum-pressure plasma-cathode electron source. *Plasma Sources Science and Technology*, 2018, vol. 27, iss. 7, p. 075002.

12. Klimov A.S., Zenin A.A., Bakeev I.Yu., Oks E.M. Formation of Gradient Metallo-ceramic Materials Using Electron-Beam Irradiation in the Forevacuum. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 62, iss. 8, pp. 1–7.

13. Klimov A., Bakeev I., Oks E., Zenin A. Forevacuum plasma source of continuous electron beam. *Laser and Particle Beams*, 2019, vol. 37, iss. 2, pp. 203–208.

14. Zielecka M. Methods of contact angle measurements as a tool for characterization of wettability of polymers. *Polymer*, 2004, vol. 49, no. 5, pp. 327–332.

15. Kwok D., Neumann A.W. Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1999, vol. 81, pp. 167–249.

16. Maddah H. A. Polypropylene as a promising plastic: A review. *American Journal of Polymer Science*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 1–11.

**Tu V. Tran**

Graduate student, Department of Physics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-960-975-48-69  
Email: tranvantu0208@gmail.com

**Aleksandr S. Klimov**

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department of Physics, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-905-990-52-41  
Email: klimov@main.tusur.ru

**Aleksey A. Zenin**

Candidate of Science in Engineering, Assistant Professor, Department of Physics, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-33-69  
Эл. почта: zenin1988@gmail.com

# Требования к подготовке рукописей статей,

представляемых для публикации в журнале

«Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»

1. Электронный вариант статьи должен быть представлен в виде файла, названного по-русски фамилией первого автора, на дискете или диске в формате Word 2003–2016. Предпочтительнее представить его по электронной почте.

2. Оригинал на бумажном носителе должен полностью соответствовать электронному варианту.

3. Статья должна иметь (в порядке следования): УДК; И.О. Фамилии авторов; заглавие; аннотация (не реферат); ключевые слова; основной текст статьи; список библиографий под подзаголовком «Литература»; сведения об авторах; далее на английском языке: Фамилии авторов И.О., заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова. Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, электронный адрес.

4. Текст статьи должен быть размещен в две колонки без принудительных переносов через один интервал шрифтом Times New Roman 10 кегля на одной стороне листа белой писчей бумаги формата А4, без помарок и вставок. Для облегчения форматирования прилагается **шаблон статьи**, который размещен на сайте: [journal.tusur.ru](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; Т, град; 7 °С). Десятичные числа пишутся через запятую (не точку).

9. Таблицы и рисунки должны иметь тематические заголовки (не повторяющие фразы-ссылки на них в тексте). (Рис. 1. Название рисунка; Таблица 1.

Название таблицы). Большие блоки расшифровки условных обозначений лучше приводить в тексте. Подписи и надписи на рис. – Times New Roman, 9 пт (после масштабирования), не жирным, не курсивом, переменные – также, как и в тексте. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте (... на рис. 3, ... в табл. 2).

10. Рисунки и фотографии должны быть **черно-белыми**, четкими, контрастными, аккуратными, сгруппированными. Графики – не жирно, сетка – четко. Единицы измерения – на русском. Десятичная запятая (не точка). Рисунки могут быть выполнены в программах CorelDraw, Illustrator, Word, Visio и должны давать возможность внесения исправлений.

11. Иллюстрации, должны быть разрешением не менее 600 dpi. Масштаб изображения – 8 или 16,7 см по ширине (при условии читаемости всех надписей, выполненных шрифтом Times New Roman, после масштабирования – 9 кегль).

12. На все источники, указанные в списке литературы, должны быть ссылки по тексту (нумерация в порядке упоминания, например, [1, 2], [5–7]). Описание источников должно соответствовать ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008 и содержать всю необходимую для идентификации источника информацию, а именно: *для неперiodических изданий* – фамилию и инициалы автора, полное название работы, место издания, название издательства, год издания, количество страниц; *для периодических изданий* – фамилию, инициалы автора, полное название работы, название журнала, год выпуска, том, номер, номера страниц (см. примеры оформления библиографий).

Бумажный вариант рукописи статьи должен быть подписан авторами и (для сторонних авторов) иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Материальные претензии авторов, связанные с распространением материалов их статей после опубликования, не принимаются.

Авторы несут полную ответственность за содержание статей и за последствия, связанные с их публикацией.

## Контактная информация

Адрес: 634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Эл. почта: [vnmas@tusur.ru](mailto:vnmas@tusur.ru). Тел.: +7 (382-2) 51-21-21

