2/2020

Вопросы радиоэлектроники

ISSN 2218-5453 (Print)
ISSN 2686-7680 (Online)

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

21–24 апреля 2020

Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

5G **Big Data** **Умный город**
Геоданные и навигационные технологии
Цифровое правительство **ЦОДы**
Информационная безопасность **IoT** **Smart Device Show**
Телеком
Искусственный интеллект **Спутниковая связь**
Умная мобильность **Российский софт**
AR&VR **Future TV**
Дроны и беспилотные системы **Стартапы**

СВЯЗЬ

32-я международная выставка
«Информационные
и коммуникационные технологии»

www.sviaz-expo.ru

НАВИТЕХ

12-я международная выставка
«Навигационные системы,
технологии и услуги»

www.navitech-expo.ru

Минкомсвязь России

Федеральное агентство связи (РОССВЯЗЬ)

НП "ГЛОНАСС" Федеральный сетевой оператор

ТПП РФ

www.hi-techweek.ru

Реклама 12+

60 ЭКСПОЦЕНТР

АО «ЦНИИ «Электроника»

ISSN 2218-5453 (Print)
ISSN 2686-7680 (Online)

Вопросы радиоэлектроники

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ТОМ 49, № 2. 2020

Серия «Общетехническая» (ОТ)
ВЫПУСК 2

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-31114 от 15 февраля 2008 года).

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации для опубликования результатов диссертационных исследований (**Перечень ВАК**).

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (**РИНЦ**).

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А. В. Фомина, д.э.н., доц., чл.-корр. Академии военных наук

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Г. В. Анцев, к.т.н., доц. (АО «НПП «Радар ммс»)
В. М. Балашов, д.т.н., проф. (АО «НПП «Радар ммс»)
Я. В. Безель, д.т.н., проф. (АО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей»)
А. И. Белоус, чл.-корр. НАН Беларуси, д.т.н., проф. (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)
А. Б. Бляхман, д.т.н., проф. (АО «ФНПЦ «ННИИРТ»)
М. М. Бутаев, д.т.н., проф. (АО «НПП «Рубин»)
Н. Ю. Жибуртович, д.т.н., проф. (АО «Корпорация Фазотрон-НИИР»)
Н. Н. Иванов, д.т.н. (ОАО «Авангард»)
А. В. Киселев, д.т.н., проф. (ФГБОУ ВО НГТУ)
В. Е. Красовский, к.т.н., проф. (ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»)
С. Ф. Боев, д.т.н., д.э.н. (ПАО «МАК «Вымпел»)
В. В. Мартынов, д.т.н., проф. (ФБГНУ «Аналитический центр»)
Н. А. Махутов, чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. (ИМАШ РАН)
Н. Л. Прохоров, д.т.н., проф. (ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»)
С. А. Прохоров, д.т.н., проф. (Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева)
В. И. Сергеев, д.т.н., доц. (ВКБ АФУ (ОАО))
П. И. Смирнов, к.т.н. (АО «НИИ «Масштаб»)
С. А. Сорокин, д.т.н. (АО «НИИВК им. М. А. Карцева»)
А. Ф. Страхов, д.т.н., проф. (АО «ГПТП «Гранит»)
В. Ф. Хватов, д.т.н. (Гостехнадзор Ленинградской области)
С. В. Хохлов (ФГУП «ГосНИИАС»)
В. И. Штейнберг, к.т.н. (АО «НИИ «Аргон»)

Полное или частичное воспроизведение материалов допускается только с письменного разрешения АО «ЦНИИ «Электроника».

При перепечатке материалов ссылка на журнал «Вопросы радиоэлектроники» обязательна.

Ответственность за содержание рекламных материалов несут рекламодатели.

Ответственность за достоверность приведенных сведений, за наличие данных, не подлежащих открытой публикации, и точность информации по цитируемой литературе несут авторы.

Позиция редакции может не совпадать с мнением автора.

Все поступившие в редакцию материалы подлежат рецензированию.

Редакция не вступает в переписку с авторами статей, получившими мотивированный отказ в опубликовании.

Материалы, переданные в редакцию, не возвращаются.

Требования к оформлению статей размещены на сайте vre.instel.ru.

Учредитель
АО «ЦНИИ «Электроника»

Издатель
АО «ЦНИИ «Электроника»

Генеральный директор, главный редактор
Алена Фомина
instel@instel.ru
+7 (495) 940-65-00

Руководитель издательского отдела
Полина Корсунская
korsunskaya_p@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Выпускающий редактор
Дмитрий Гудилин
gudilin@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Реклама
Полина Корсунская
korsunskaya_p@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Распространение и подписка
Вероника Филиппова
filippova_v@instel.ru
+7 (495) 940-65-46

Корректор
Лариса Ильина

Компьютерная верстка
Григорий Арифулин

Адрес редакции
127299, г. Москва,
ул. Космонавта Волкова, д. 12
+7 (495) 940-65-00
www.instel.ru
instel@instel.ru

Подписка

В редакции
publish@instel.ru
+7 (495) 940-65-46

Агентство «Роспечать»
Индекс **84529**
(каталог «Газеты. Журналы»)
Индекс **59981**
(каталог «Научно-технические издания»)

Агентство «Урал-Пресс»
www.ural-press.ru
+7 (495) 961-23-62

Подписано в печать 20.02.2020.

Отпечатано в ООО «Типография «Миттель Пресс».

© АО «ЦНИИ «Электроника», 2020

ISSN 2218-5453 (Print)
ISSN 2686-7680 (Online)

Voprosy radioelektroniki

(Issues of radio electronics)

SCIENTIFIC JOURNAL ***Vol. 49, no. 2. 2020***

General technical series
VOLUME 2

The journal is registered at the Federal Service for Compliance with the Law in Mass Communications and Cultural Heritage Protection (Certificate PI № FS77-31114 of February 15th, 2008).

The journal is included into the List of periodicals recommended by the State commission for academic degrees and titles for publishing of dissertation research results.

This journal is included in Russian Science Citation Index (RSCI).

EDITOR-IN-CHIEF

A. V. Fomina, Doctor of Economics, Associate Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Military Sciences

EDITORIAL COUNCIL

G. V. Antsev, Candidate of Engineering, Associate Professor (Radar mms)
V. M. Balashov, Doctor of Engineering, Professor (Radar mms)
Y. V. Besel, Doctor of Engineering, Professor (Concern PVO Almaz-Antei)
A. I. Belous, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Engineering, Professor (Joint Stock Company INTEGRAL)
A. B. Blyakhman, Doctor of Engineering, Professor (NNIIRT)
M. M. Butaev, Doctor of Engineering, Professor (NPP Rubin)
N. Y. Zhiburtovich, Doctor of Engineering, Professor (PHAZOTRON-NIIR)
N. N. Ivanov, Doctor of Engineering (Public Joint Stock Company Avangard)
A. V. Kiselev, Doctor of Engineering, Professor (Novosibirsk State Technical University)
V. E. Krasovskiy, Candidate of Engineering, Professor (The Institute of Electronic Control Computers named after I. S. Bruk)
S. F. Boev, Doctor of Engineering, Doctor of Economics (MAK Vympel)
V. P. Martynov, Doctor of Engineering, Professor (Analytical Center at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation)
N. A. Makhutov, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering, Professor (Russian Academy of Sciences)
N. L. Prokhorov, Doctor of Engineering, Professor (The Institute of Electronic Control Computers named after I. S. Bruk)
S. A. Prokhorov, Doctor of Engineering, Professor (Samara University)
V. I. Sergeev, Doctor of Engineering, Associate Professor (Voronezh Design Bureau Antenna Feeders)
P. I. Smirnov, Candidate of Engineering (Scientific Research Institute Mashtab)
S. A. Sorokin, Doctor of Engineering (Scientific Research Institute of Computer Science named after M. A. Karzev)
A. F. Strakhov, Doctor of Engineering, Professor (Head center maintenance and repair Granite)
V. F. Khvatov, Doctor of Engineering (State Technical Supervision Body of Leningrad Region)
S. V. Khokhlov (GosNIIAS)
V. I. Shteinberg, Candidate of Engineering (Research Institute «Argon»)

Full or partial reproduction of materials is allowed only with the written permission of the Central Research Institute of Economy, Management Systems and Information «Electronics».

At a reprint of materials the link on journal «Issues of radio electronics» is mandatory.

Advertisers are responsible for the content of advertisements.

Authors are responsible for reliable information, for the availability of data are not subject to open publication, and accuracy of information on the cited literature.

The editorial standpoint may not correspond with authors' opinions.

All incoming manuscripts are subject to review.

Editors do not correspond with authors, whose articles are considered unsuitable for the publication. Materials sent to the editor will not be returned.

Founder
Central Research Institute of Economy, Management Systems and Information «Electronics»

Publisher
Central Research Institute of Economy, Management Systems and Information «Electronics»

General director, Editor-in-Chief
Alena Fomina
instel@instel.ru
+7 (495) 940-65-00

Head of publish department
Polina Korsunskaya
korsunskaya_p@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Managing editor
Dmitry Gudilin
gudilin@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Advertise
Polina Korsunskaya
korsunskaya_p@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Distribution and subscribe
Veronika Filippova
filippova_v@instel.ru
+7 (495) 940-65-46

Proofreader
Larisa Ilyina

Design
Grigoriy Arifulin

Editorial office
Kosmonavta Volkova st., 12,
Moscow, Russian Federation,
127299
+7 (495) 940-65-00
www.instel.ru
instel@instel.ru

Subscribe
publish@instel.ru
+7 (495) 940-65-46

Signed to print 20.02.2020.

Printed in Mittel Press.

© CRI Electronics, 2020

АО «ЦНИИ «Электроника»

Вопросы радиоэлектроники

СОДЕРЖАНИЕ

На пути к новой аспирантуре **5**

РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

Волков В. Ю.
Обнаружение объектов на изображениях с использованием селекции по площади **6**

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Шуменков Д. Г., Разумов И. Н., Здех В. Л.
Применение скриптовых языков программирования для решения задач автоматизированного тестирования при проведении испытаний электронных цифровых устройств **12**

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА В МЕДИЦИНЕ

Ястребов А. В., Трофимов П. М., Амосова О. В., Тишков А. В., Чиж И. А., Шаповалов В. В., Козырев А. Б.
Распределения биоимпеданса в тканях молочной железы с новообразованием (моделирование и эксперимент) **16**

ТЕХНИКА СВЧ

Попов А. А., Билевич Д. В., Сальников А. С., Калентьев А. А.
Исследование влияния параметров техпроцесса на электрофизические характеристики полевого транзистора с барьером Шоттки с применением приборно-технологического моделирования **23**

Митьков А. С., Рубанович М. Г.
Модульные сверхвысокочастотные аттенюаторы высокого уровня мощности **31**

Горбачев А. П., Паршин Ю. Н.
Печатная четырехлучевая фазированная антенная решетка с модифицированными дифференциальными фазовращателями **38**

УПРАВЛЕНИЕ, ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА

Петрушевская А. А., Алешкин Н. А.
Модель оптимизации процесса управления производством радиоэлектронных изделий **46**

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ

Щеников Я. А., Сидоров В. О.
Риск-менеджмент процессов входного контроля электронной компонентной базы **51**

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ 57

© АО «ЦНИИ «Электроника», 2020

CRI Electronics

Voprosy *radioelektroniki*

(Issues of radio electronics)

CONTENTS

On the way to a new graduate school **5**

RADAR AND RADIO NAVIGATION

Volkov V. Yu.
Detection of objects in images using area selection **6**

APPLIED PROBLEMS OF INFORMATION TECHNOLOGY

Shumenkov D. G., Razumov I. N., Zdeh V. L.
Use of scripting languages to solve problems of automated testing for testing electronic digital devices **12**

ELECTRONICS IN MEDICINE

Yastrebov A. V., Trofimov P. M., Amosova O. V., Tishkov A. V., Chizh I. A., Shapovalov V. V., Kozyrev A. B.
Distributions of bioimpedance in breast tissue with neoplasm (modeling and experiment) **16**

MICROWAVE TECHNOLOGY

Popov A. A., Bilevich D. V., Salnikov A. S., Kalentyev A. A.
A study of technology parameters influence on the electrophysical characteristics of a MESFET using TCAD simulations **23**

Mitkov A. S., Rubanovich M. G.
High power modular microwave attenuators **31**

Gorbachev A. P., Parshin Yu. N.
Printed four-beam phased antenna array with modified differential phase shifters **38**

MANAGEMENT, ORGANIZATION AND ECONOMICS

Petrushevskaya A. A., Aleshkin N. A.
Model for optimizing production of electronic products **46**

RISK MANAGEMENT

Shchenikov Ya. A., Sidorov V. O.
Risk management of electronic component incoming inspection processes **58**

RULES FOR SUBMITTING ARTICLES 59

© CRI Electronics, 2020

На пути к новой аспирантуре

4 февраля 2020 года Государственная Дума Российской Федерации поддержала в первом чтении проект Федерального закона № 860618–7 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)». Стоит отметить, что данный законопроект, инициатором которого выступило Министерство науки и высшего образования России, направлен на обеспечение реализации национального проекта «Наука».

Какие изменения произойдут в работе аспирантур после одобрения и подписания этого закона? Главное новшество заключается в том, что программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре будут реализовываться на основе федеральных государственных требований вместо действующих в настоящее время образовательных стандартов. Сами требования будет утверждать Минобрнауки России, однако, для ряда вузов, в том числе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургского государственного университета, федеральных и национальных исследовательских университетов сделали исключение – им будет предоставляться право разрабатывать и утверждать такие требования самостоятельно.

Цель нововведения – переориентировать программы аспирантур на подготовку научно-квалификационных работ. Документ предполагает, что для прохождения итоговой аттестации аспирант будет обязан представить готовую к защите диссертацию, а не выпускную квалификационную работу, как это практикуется в настоящее время. Порядок проведения итоговой аттестации также будет устанавливать Минобрнауки России.

Законопроект получил положительный отклик и поддержку со стороны Ассоциации классических университетов России и Президиума РАН. В частности, в постановлении последнего от 27 ноября 2018 года отмечается, что «аспирантура, как уровень образования, должна основываться на научной работе, а образовательная составляющая программ должна существовать в том объеме и тех формах, которые способствуют успешной исследовательской деятельности аспиранта».

Вместе с тем у нового закона есть и противники. Так, в экспертном заключении Совета при Президенте Российской Федерации по кодификации и совершенствованию гражданского законодательства указано, что, во-первых, вывод разработки программ аспирантуры из-под действия образовательных стандартов и введение категории федеральных государственных требований по существу ничего не изменят; во-вторых, институт аспирантуры принципиально несовместим с системой высшего образования, построенной по болонской модели, которая включает бакалавриат и магистратуру. Члены совета видят решение существующих проблем в переводе института аспирантуры из сферы высшего образования в сферу науки и научной политики.

Признавая существование некоторых недостатков законопроекта, хотелось бы поддержать усилия его разработчиков в части повышения эффективности работы аспирантур. Сегодняшний уровень числа защит аспирантов по итогам обучения составляет всего лишь 18%, что явно свидетельствует о необходимости внесения изменений в существующую модель функционирования института аспирантуры. В противном случае существует достаточно высокий риск того, что достижение одного из важных целевых показателей национального проекта «Наука», а именно увеличение числа исследователей до 2024 года на 35 тысяч человек, окажется под вопросом.

А.В. Фомина,
доктор экономических наук,
главный редактор журнала «Вопросы радиоэлектроники»

Для цитирования: Волков В.Ю. Обнаружение объектов на изображениях с использованием селекции по площади // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 6–11.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-6-11
УДК 004.932.2: 621.396.96

В.Ю. Волков[1, 2]

[1] АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», [2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕЛЕКЦИИ ПО ПЛОЩАДИ

Целью работы является исследование эффективности алгоритмов обнаружения объектов интереса на изображениях, получаемых системами дистанционного наблюдения. Основными свойствами объектов по отношению к фону являются их компактность и изолированность. Рассматриваемые алгоритмы используют многопороговую обработку, дающую набор бинарных срезов. Это дает возможность проводить морфологическую обработку объектов на каждом срезе в целях анализа их геометрических характеристик и последующей селекции. В результате удается установить адаптивный порог обнаружения объектов. Использование селекции по площади позволяет существенно уменьшить число ложных тревог при обнаружении и использовать пороги более низкого уровня, что обеспечивает увеличение вероятности правильного обнаружения объектов интереса. Представлены результаты обработки тестовых моделей изображений, а также результаты обнаружения объектов на реальном изображении, показывающие эффективность рассматриваемого алгоритма.

Ключевые слова: *обнаружение и селекция объектов, многопороговая обработка, сегментация изображений*

Введение

Задачи обнаружения, выделения и локализации объектов интереса на изображениях различной природы весьма актуальны и интенсивно исследуются. Они решаются телевизионными, инфракрасными, лазерными и радиолокационными системами наблюдения с синтезированными апертурами. Несмотря на специфику, присущую изображениям в различных системах наблюдения, существуют общие методы обработки изображений, которые условно делятся на три группы [1], основанные, соответственно, на сопоставлении шаблонов, знаниях об объекте интереса и машинном обучении. В настоящей статье будет рассмотрен второй подход как наиболее отвечающий задачам дистанционного наблюдения в реальном времени.

Методы, использующие информацию об объекте, существенно различаются тем, в какой форме и насколько полно эта информация может быть представлена. В общей постановке задачи объект интереса представляется кластером, т.е. совокупностью связанных пикселов с интенсивностью, большей, чем интенсивность в окружающих его областях [2]. Для обнаружения таких объектов применяются сканирующие статистики (scan statistic) на основе, например, расширяющихся круговых сканирующих окон [3].

Трудности описания статистических свойств как объектов интереса, так и фона препятствуют эффективному применению параметрических алгоритмов и вызывают интерес к непараметрическим методам формирования решающих статистик. В частности, при отсутствии каких-либо сведений о форме объекта решающая статистика выделяет кластер с наибольшим числом связанных пикселов (maximum cluster test) при пороговой обработке [2, 4]. Фактически обнаруживается объект с наибольшей площадью на срезе при данном пороговом уровне.

Площадь объекта является весьма эффективным признаком для селекции при многопороговой обработке [5]. Однако трудности при реализации алгоритмов связаны с необходимостью указания абсолютных значений площади в пикселях. Обычно можно исключить из рассмотрения мелкие объекты, которые возникают из-за фона либо являются фрагментами более крупных объектов, претерпевших разрушение при данном значении порога.

Использование селекции объектов позволяет устанавливать адаптивный порог обнаружения. При селекции по площади адаптация возможна по максимальному числу объектов. В этом случае устанавливается адаптивный глобальный порог, что эффективно при обнаружении группы однотипных

объектов. Это позволяет существенно уменьшить число ложных тревог при обнаружении и использовать пороги более низкого уровня, что увеличивает вероятность правильного обнаружения объектов интереса.

Важной задачей является исследование эффективности использования указанной селекции при обнаружении компактных объектов интереса на шумовом фоне.

Постановка задачи и метод решения

В настоящей статье рассматривается метод выделения изолированных связанных объектов, основанный на многопороговой обработке, результаты которой используются для выбора наилучшего порога бинаризации. Считается, что главным свойством, отличающим интересующий объект от фонового шума, является связность соседних пикселей объекта в двоичном изображении. Этим свойством определяется формирование изолированных объектов на каждом двоичном слое. Рассмотрим пороговую обработку с использованием глобального порога.

Пусть монохромное изображение $I(x, y)$, где I – интенсивность, а x, y – координаты пикселей, бинаризовано фиксированным глобальным порогом T. Результатом является двоичный слой B_T: $\{B_T = 1$, если $I(x, y) \geqslant T$; $B_T = 0$, если $I(x, y) < T\}$, в котором подмножество единиц представляет объекты интереса (foreground), например, здания, сооружения, транспортные средства, береговую линию, а подмножество нулей относится к фону (background), который определяется ландшафтом области наблюдения.

Если интенсивности пикселов объектов интереса в основном выше интенсивностей фоновых пикселов, то для выбора глобального порога принято использовать метод Отсу, работающий в довольно общих условиях. Он основан на анализе гистограммы исходного изображения и дает минимальную сумму внутригрупповых дисперсий для подмножеств $\{I(x, y) > T\}$ и $\{I(x, y) \leqslant T\}$ соответственно. Ясно, что в практических сценариях объекты интереса размыты, а фон неоднороден и зашумлен, что в случае глобального порога приводит к перекрытию участков распределений для указанных подмножеств и неизбежным ошибкам.

В идеале для каждого объекта интереса требуется устанавливать свое значение порога. Такие локальные пороги возможно сформировать при использовании локальных (скользящих) окон, в пределах которых фон считается однородным. При этом необходимо задать контролируемую или базовую (связанную с размерами ожидаемого объекта) и опорную (фоновую) области. Опорная область располагается вблизи контролируемой и используется для формирования адаптивного порога [5]. Эти методы требуют априорного знания размеров объекта интереса. Кроме того, использование фонового окна приводит к потере разрешающей способности по близким объектам и к подавлению одного объекта соседними, которые попадают в область окна.

Рассмотрим тестовое изображение, содержащее квадратный объект, искаженный аддитивным гауссовским шумом (рис. 1а).

Модель содержит гауссово шумовое поле со стандартным нормальным распределением с нулевым средним и единичной дисперсией. Пиксели в поле сигнала содержат в значениях положительный сдвиг Δ. Тестовое изображение получается путем преобразования диапазона значений. Результирующее изображение имеет 8-битный целочисленный тип данных с нулевым минимальным значением и максимумом, равным 255. Отношение сигнал-шум равно половине. Результат бинаризации Otsu показан на рис. 1б.

Очевидно, что изображение после бинаризации содержит слишком много ложных тревог, которые можно устранить, удалив мелкие объекты. Это проиллюстрировано на рис. 1в, где были удалены небольшие объекты с площадью менее $S_{\min}$ = 50 пикселей.

Попытки подавить фоновые выбросы и уменьшить ложные тревоги с помощью повышения порогового уровня неэффективны, поскольку можно потерять объект интереса, как показано на рис. 1г, где бинаризация была выполнена с высоким порогом без селекции. Можно видеть два типа искажений и помех: пропадание точек и разрушение (фрагментацию) объекта для порога высокого уровня (рис. 1в, д); появление на низком пороговом уровне фрактальных шумовых разрастаний на границе объекта и вне его (рис. 1е).

Рассмотрим случай, когда изображение содержит ряд однотипных объектов, которые необходимо выделить. На каждом бинарном слое выбираются объекты, удовлетворяющие заданным свойствам, а порог бинаризации для них задается таким образом, чтобы получить максимальное количество объектов данной категории (или их пикселов) с учетом требуемого сохранения их формы. Этот процесс может быть автоматизирован, что приводит к адаптивным пороговым методам. Структура алгоритма выбора объекта по площади показана на рис. 2.

Фильтр F выполняет предварительную фильтрацию для сглаживания и подавления шума. Далее изображение подвергается многопороговой обработке. Каждый канал имеет свой собственный диапазон областей изолированных объектов. При изменении порога с низкого на высокий общее количество выделенных объектов сначала увеличивается, достигает максимума, а затем уменьшается.

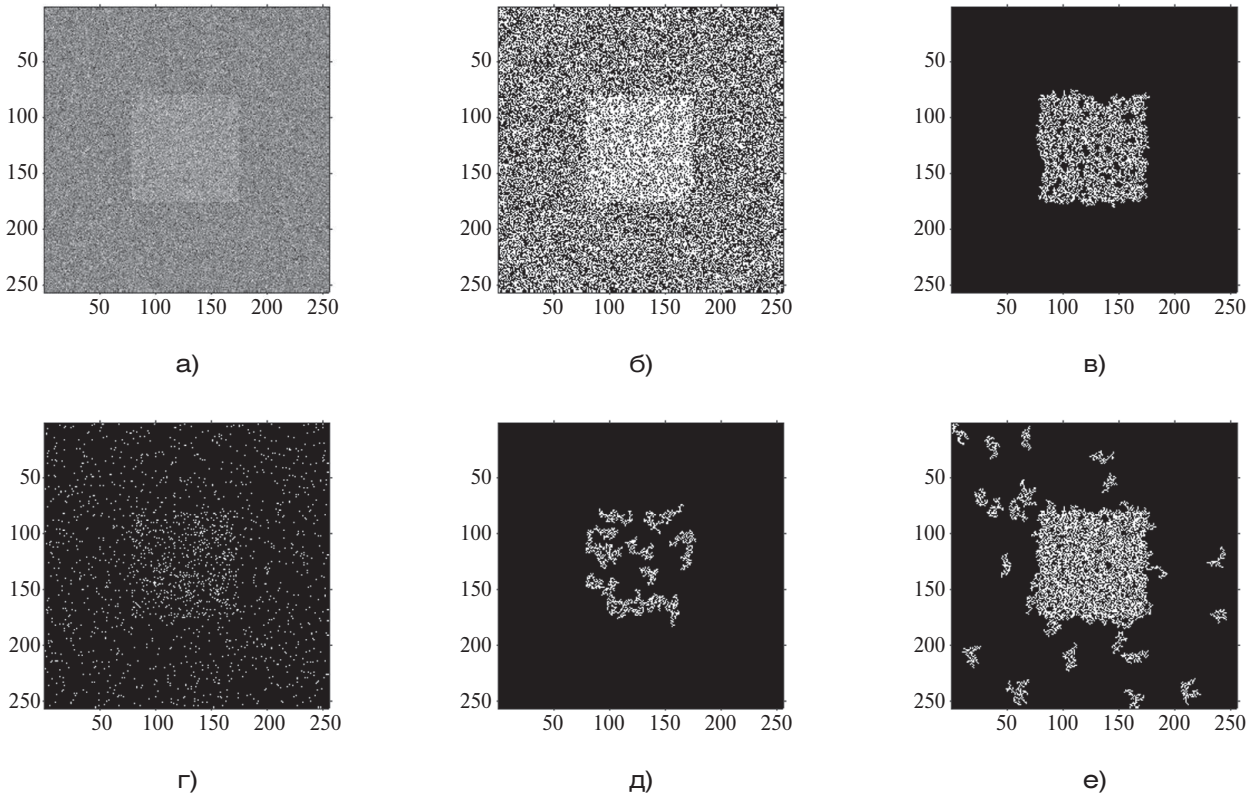


Рисунок 1. Тестовое изображение (а) и результаты бинаризации и селекции объекта: б – с порогом Otsu *thr* = 120; в – с порогом T = 140 после селекции с S_{min} = 50; г – с высоким порогом T = 180 без селекции; д – с высоким порогом T = 150 после селекции с S_{min} = 50; е – с низким порогом T = 135 после селекции с S_{min} = 50

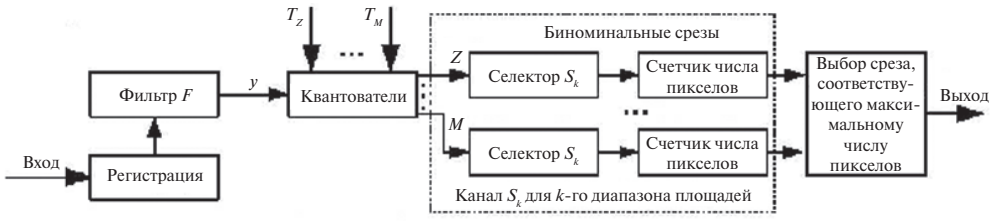


Рисунок 2. Структура селекции объектов по площади

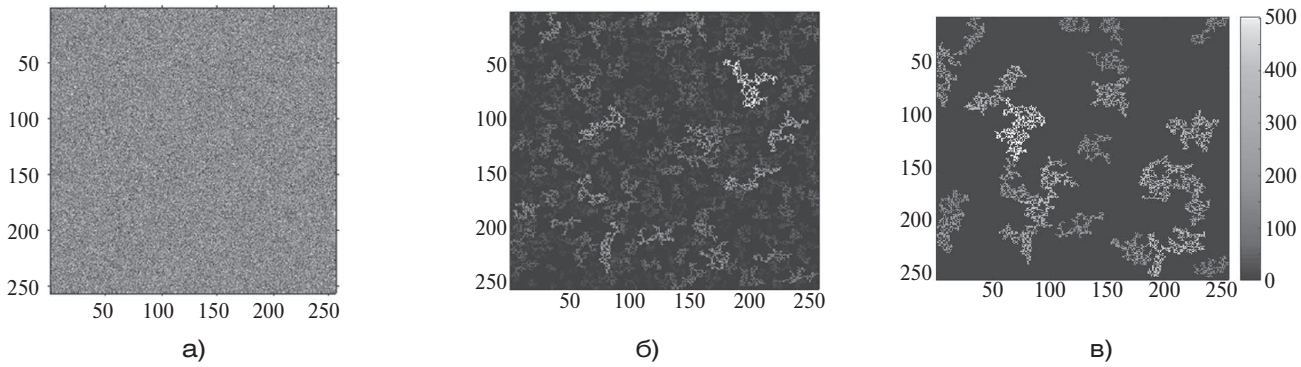
При выборе объектов в узком диапазоне областей их максимальное количество появляется при определенном пороговом значении [5]. Это позволяет выбирать объекты, подсчитывая их количество либо число пикселов в них и устанавливая пороговые значения на соответствующих уровнях. Процесс установки порога может быть автоматизирован, что приводит к адаптивным методам.

Характеристики обнаружения при селекции объектов по площади

Рассмотрим бинаризацию чистого шумового поля, показанную на рис. 3а.

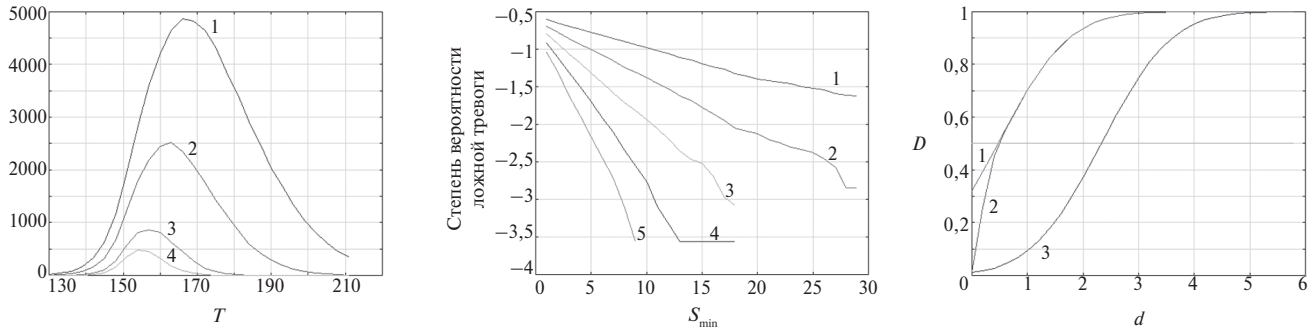
Результаты селекции объектов в шуме представлены на рис. 3б и 3в для S_{min} = 10 и 150 пикселей соответственно. При этом пороги выбирались в соответствии с положением максимума числа объектов, оставшихся после селекции. Количество изолированных объектов на срезе изображения шума зависит от порогового уровня, как показано на рис. 4а верхней линией *1*.

Максимум изолированных объектов N_{max} = 4866 появляется при пороге T = 166. Зависимости числа отселектированных объектов после удаления небольших объектов с S_{min} = 1, 5, 10 показаны на рис. 4а соответствующими линиями *2–4*. После удаления изолированных точек с S_{min} = 1 максимальное количество оставшихся объектов N_{max} = 2522 при T = 163. Для S_{min} = 5 имеем: N_{max} = 863 при T = 157; для S_{min} = 10 получено N_{max} = 483 при T = 154. Таким образом, количество выделенных объектов уменьшается с увеличением параметра S_{min}, а положение



а) б) в)

Рисунок 3. Селекция шумовых объектов: а – чистое шумовое поле; б – S_{min} = 10; в – S_{min} = 150



а) б) в)

Рисунок 4. Анализ задачи обнаружения на фоне гауссовского шума: а – зависимости числа объектов от порога *T* для набора значений S_{min}; б – зависимости степени вероятности ложной тревоги от S_{min} для набора значений порога *T*; в – характеристики обнаружения объекта интереса: зависимость вероятности правильного обнаружения *D* от отношения сигнал/шум *d*

максимума несколько смещается в сторону более низких пороговых значений. Следствием выделения и удаления мелких объектов является возможность снижения порогового уровня с сохранением низкой вероятности ложной тревоги при обнаружении полезных объектов. Чем больше площадь шумовых объектов, подлежащих удалению, тем более низкий порог обнаружения может быть установлен при одинаковой вероятности ложной тревоги.

Вероятность ложной тревоги зависит от минимальной площади обнаруженных объектов S_{min} (ось x), как показано на рис. 4б в логарифмическом масштабе. Кривые получены путем моделирования. Для заданного порога и для каждой области S_{min} (которая указывается в пикселях вдоль горизонтальной оси) подсчитано и нормировано к размеру поля количество превышений шума. Ось ординат представляет собой десятичный логарифм этого нормированного значения, который соответствует расчетной степени вероятности ложной тревоги. Кривые *1–5* соответствуют возрастающим пороговым уровням T = 150, 155, 160, 165, 170.

Рассмотренный метод анализа используется для решения задачи обнаружения, в которой объект обнаруживается путем задания порогового уровня t_{NP}, удовлетворяющего критерию Неймана – Пирсона для каждого пикселя.

Рассмотрим задачу обнаружения без учета формы объекта, которая обычно неизвестна. Пусть мы имеем сдвиг в математическом ожидании в области сигнала для гауссовского шумового поля (например, рис. 1). При отсутствии селекции объектов вероятность обнаружения для каждого пикселя в сигнальном поле вычисляется по формуле

$$D = 1 - \Phi(t_{NP} - d),$$

где d – отношение сигнал/шум (дефлекция решающей статистики), Φ – интеграл вероятности Лапласа, t_{NP} – нормированный порог для получения заданной вероятности ложной тревоги F. Эта характеристика обнаружения показана кривой *3* на рис. 4в для F = 0,01 и нормированного порога t_{NP} = 2,326. Ось x показывает отношение сигнал/шум d (дефлекцию). Пороговая дефлекция для обеспечения вероятности правильного обнаружения D = 0,5 равна $d(0,5)$ = 2,326.

В случае селекции объектов предполагается, что область сигнала больше, чем параметр S_{min}, который используется в алгоритме. Удаление небольших шумовых объектов из двоичного изображения

снижает количество ложных тревог и уменьшает порог обнаружения для заданного значения вероятности ложной тревоги. Для $S_{\min} = 150$ в этой задаче он дает нормированный порог $t_{NP} = 0{,}47$ вместо 2,326. Понятно, что без селекции более низкий порог даст значительно большую вероятность ложной тревоги (0,32), что показывает кривая *1* на рис. 4в. В то же время селекция позволяет сохранить низкое значение порога обнаружения без роста вероятности ложной тревоги, что в результате дает увеличение вероятности правильного обнаружения (кривая *2* на рис. 4в).

Селекция объектов на реальном изображении

Изображение на рис. 5а получено с помощью системы дистанционного наблюдения. Задача состоит в том, чтобы выделить все интересующие объекты. Детектор Отсу не справляется из-за низкого порога, в результате чего все объекты сливаются (рис. 5б). Зависимость числа изолированных объектов от порогового уровня показана на рис. 5в. Верхняя кривая *1* показывает все изолированные объекты, кривая *2* представляет объекты после селекции по площади в интервале $S = (100, 300)$. Эта зависимость используется для установки наилучшего порога. Из общего количества – 460 объектов можно выделить 24 изолированных. Результат селекции объектов показан на рис. 5г.

Недостатком селекции по площади является необходимость задания параметра площади в абсолютных величинах (пикселах), что затруднительно в случаях изменения масштаба изображения. Этот метод плохо работает в случае неоднородного фона, который может давать ложные объекты, сравнимые по площади с объектами интереса (рис. 5в).

Заключение

Использование селекции объектов интереса на изображении является эффективным средством улучшения характеристик обнаружения за счет снижения порогового уровня. Для вероятности ложной тревоги 0,01 при гауссовской статистике обеспечивается почти двукратный выигрыш в пороговом отношении сигнал/шум. Селекция объектов по площади позволяет установить адаптивный пороговый уровень по максимальному числу объектов выбранной категории.

Стоит отметить, что адаптация порогового уровня по максимуму отселектированных объектов данной категории имеет смысл в тех ситуациях,

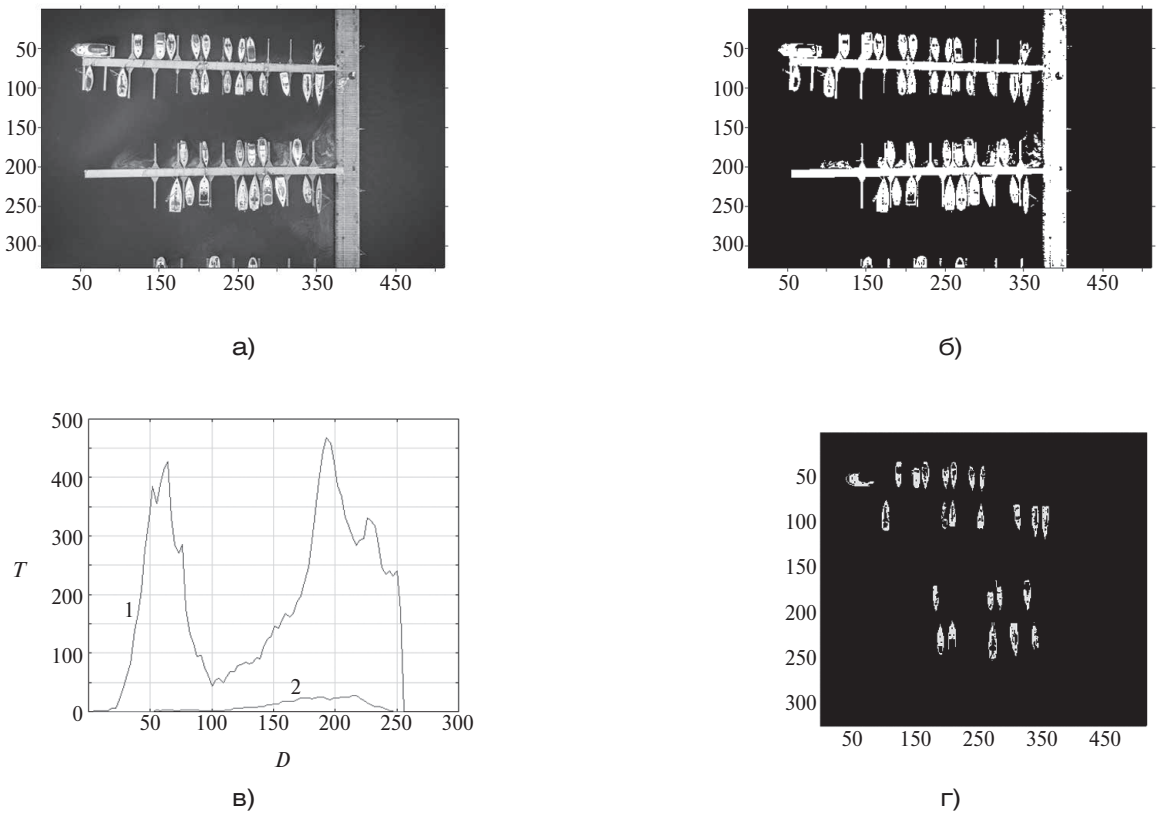


Рисунок 5. Селекция реальных объектов: а – изображение получено с помощью системы дистанционного наблюдения; б – изображения объектов, выделенных детектором Отсу; в – зависимости числа изолированных объектов от порогового уровня *T*; г – результат селекции объектов

когда сцена содержит достаточное их количество. Также алгоритм использует априорную информацию о типичной минимальной площади объектов интереса. Кроме того, обеспечивая наибольшую вероятность правильного обнаружения, метод дает несколько более низкое значение порогового уровня с точки зрения сохранения формы объектов. Эти недостатки могут быть устранены применением более совершенных методов адаптации, например геометрических инвариантов [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cheng G., Han J. A survey on object detection in optical remote sensing images // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. No. 117. P. 11–28.
2. Arias-Castro E., Grimmett G. R. Cluster detection in networks using percolation // Bernoulli. 2013. Vol. 19. No. 2. P. 676–719.
3. Patil G. P., Taillie C. Upper level set scan statistic for detecting arbitrarily shaped hotspots // Environmental and Ecological Statistics. 2004. Vol. 11. P. 183–197.
4. Langovoy M., Wittich O. Randomized algorithms for statistical image analysis and site percolation on square lattices // Statistica Neerlandica. 2013. Vol. 67. Iss. 3. P. 337–353.
5. Волков В. Ю., Богачев М. И., Маркелов О. А. Многопороговая селекция объектов на изображениях в системах дистанционного наблюдения // Радиопромышленность. 2019. Т. 29. № 2. С. 76–88.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Волков Владимир Юрьевич, д. т. н., профессор, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А; ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, тел.: 8 (905) 280-87-81, e-mail: volkov_vju@radar-mms.com.

For citation: Volkov V. Yu. Detection of objects in images using area selection. Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 6–11.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-6-11

V. Yu. Volkov

DETECTION OF OBJECTS IN IMAGES USING AREA SELECTION

The aim of the work is to study the effectiveness of algorithms for detecting objects of interest in images obtained by remote surveillance systems. The main properties of objects in relation to the background are their compactness and isolation. The algorithms in question use multithresholding, which yields a set of binary slices. It allows to carry out morphological processing of objects on each slice for the purpose of the analysis of their geometrical characteristics and the subsequent selection. As a result, an adaptive object detection threshold can be set. The use of area selection can significantly reduce the number of false alarms during detection and use lower-level thresholds, which increases the probability of correct detection of objects of interest. Results of processing of test models of images, and also results of detection of objects on the real image showing efficiency of the considered algorithm are presented.

Keywords: detection and selection of objects, multi-threshold processing, image segmentation

REFERENCES

1. Cheng G., Han J. A survey on object detection in optical remote sensing images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, no. 117, pp. 11–28.
2. Arias-Castro E., Grimmett G. R. Cluster detection in networks using percolation. *Bernoulli*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 676–719.
3. Patil G. P., Taillie C. Upper level set scan statistic for detecting arbitrarily shaped hotspots. *Environmental and Ecological Statistics*, 2004, vol. 11, pp. 183–197.
4. Langovoy M., Wittich O. Randomized algorithms for statistical image analysis and site percolation on square lattices. *Statistica Neerlandica*, 2013, vol. 67, iss. 3, pp. 337–353.
5. Volkov V. Yu., Bogachev M. I., Markelov O. A. Multi-threshold object selection in images in remote sensing systems. *Radio industry (Russia)*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 76–88. (In Russian).

AUTHOR

Volkov Vladimir, D. Sc., professor, chief of the department, «NPP «Radar mms» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation; professor of the radioengineering dept., Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, tel.: +7 (905) 2808781, e-mail: volkov_vju@radar-mms.com.

Для цитирования: Шуменков Д.Г., Разумов И.Н., Здех В.Л. Применение скриптовых языков программирования для решения задач автоматизированного тестирования при проведении испытаний электронных цифровых устройств // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 12–15.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-12-15
УДК 004.42

Д.Г. Шуменков[1], И.Н. Разумов[1], В.Л. Здех[1]

[1] АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

ПРИМЕНЕНИЕ СКРИПТОВЫХ ЯЗЫКОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

В статье рассмотрен один из способов автоматизации тестирования с использованием стендового оборудования, при котором применяются скриптовые языки программирования. Обоснована необходимость автоматизированного тестирования электронных цифровых устройств. Приведены достоинства и недостатки скриптовых языков программирования. Объяснен механизм работы программного обеспечения, установленного на персональном компьютере в составе стендового оборудования, при проведении тестирования с использованием скриптов. Описан способ автоматизированного тестирования, при котором скрипты и результаты проведенных испытаний содержатся в базе данных. Рассмотрен способ реализации тестирования с использованием скриптовых языков программирования, используя библиотеку программирования Qt на языке высокого уровня C++. Указаны достоинства и недостатки применения библиотеки программирования Qt. Приведены примеры реализации запуска скриптов из ПО тестирования, созданного в среде разработки Qt.

Ключевые слова: *программное обеспечение, стендовое оборудование, библиотека программирования Qt*

Введение

Современные электронные цифровые устройства имеют сложные алгоритмы работы, множество функций и режимов, что ведет к увеличению сроков разработки изделий и трудоемкости проводимых испытаний. Одним из способов уменьшения трудозатрат на разработку и проведение испытаний является автоматизация тестирования.

Тестирование современных устройств осуществляется с использованием стендового оборудования, в состав которого входит набор устройств, используемых для проведения испытаний и измерений. Тестирование устройства может быть выполнено в ручном режиме в соответствии с составленной методикой, в которую записываются все необходимые действия. Специалист, проводящий тестирование, выполняет описанные в методике инструкции вручную, например, подает напряжение на устройство, выставляет нужный режим, снимает показания с датчиков. После завершения тестирования все результаты заносятся в протокол. При данном подходе много времени уходит на разработку и изучение методики, настройку оборудования, выставление нужных параметров на устройстве, подготовку тестирования и снятие результатов с измерительных приборов. Также присутствует фактор человеческой ошибки.

Для автоматизации тестирования в состав стендового оборудования включается управляющий персональный компьютер, разрабатывается программное обеспечение (ПО), в котором каждый тест реализован в виде отдельного программного модуля [1]. При этом возможно повторное использование ПО и достигается снижение трудоемкости. Недостатком данного подхода является необходимость реализации новых программных модулей при изменении методики тестирования или конфигурации оборудования. Это не позволяет обеспечить достаточной универсальности и гибкости разрабатываемых тестов.

Применение скриптов для решения задач автоматизированного тестирования

Для обеспечения гибкости и универсальности разрабатываемых тестов может быть использован подход с применением языков сценариев

(скриптовых языков программирования). ПО тестирования в этом случае состоит из основного модуля, запускающего скрипты, и нескольких программных модулей, обеспечивающих связь с устройствами стенда. Скрипты управляют работой программных модулей, проводят инициализацию устройств, опрашивают их и на основе полученных результатов делают вывод о прохождении теста. При данном подходе в случае изменения конфигурации оборудования или входных данных и методики тестирования нет необходимости изменять программный модуль, написанный на языке высокого уровня.

Использование скриптов [2] при разработке стендового оборудования характеризуется следующими достоинствами по сравнению с применением языков высокого уровня:

- скрипты не требуют компиляции, поэтому при внесении изменений в сценарий теста не требуется перекомпилировать программный комплекс полностью;
- при изменении состава стенда не требуется переписывать программу, управляющую тестированием;
- можно управлять цифровыми устройствами стенда, используя библиотеки, написанные на языке низкого уровня;
- облегчается реализация набора сценариев тестирования;
- можно выполнить отладку сценария в интерактивном режиме;
- возможно сформировать набор сценариев на пользовательском уровне, не переходя на более сложные уровни программирования.

Для формирования набора тестов, их хранения и запуска может быть использована база данных скриптов. В рамках подготовки к тестированию предполагается создание наборов скриптов для каждого вида испытаний и сохранение их в базе данных. При проведении тестирования пользователь выбирает необходимый набор тестов и запускает их выполнение. Далее ПО тестирования выгружает из базы данных скрипты, соответствующие выбранному набору тестов, и запускает последовательное их выполнение. В ходе работы скрипт проверяет соответствие полученных результатов заявленным требованиям и делает выводы об успешности прохождения теста. По завершении выполнения скрипт формирует результаты тестирования, которые сохраняются в базу данных.

Реализация программы тестирования, используя C++ и библиотеку Qt

Одним из вариантов реализации ПО проведения тестирования является использование библиотеки Qt, написанной на языке программирования C++. Qt обладает следующими преимуществами перед другими библиотеками, используемыми на отечественных предприятиях:

- кросс-платформенность;
- открытый исходный код;
- подробная документация по использованию библиотеки.

Кросс-платформенность позволяет осуществить переход с одной платформы на другую, например, с Windows на Astra Linux, без доработки исходного кода. Так как использование лицензируемого ПО от зарубежных поставщиков сопряжено с санкционными рисками, приоритетным решением следует признать применение библиотек с открытым исходным кодом.

Библиотека Qt имеет встроенные инструменты для запуска и работы со скриптами – модули QtScript [3] и QJSEngine [4]. QtScript появился в Qt, начиная с версии 4.3. QJSEngine появился в Qt 4.7 и активно развивается в нынешнее время.

Пример реализации ПО тестирования

Для применения скриптовых языков программирования при проведении тестирования цифрового электронного устройства было реализовано ПО, интерфейс которого представлен на рисунке.

В интерфейсе ПО тестирования предусмотрен список тестов, составленный в соответствии с документом методики проведения тестирования. В каждый подпункт проверки записан скрипт, который хранится в базе данных. Для выполнения проверки пользователь должен нажать на кнопку «Старт» у соответствующего пункта. После этого скрипты будут выполнены в порядке их расположения в списке тестов, и напротив каждого выполненного пункта будут отображены результат проверки и решение о прохождении теста. После прохождения всех пунктов тестирования пользователь может распечатать протокол с автоматически занесенными в него результатами тестирования, нажав на кнопку «Печать протокол».

Заключение

Использование скриптов позволяет уменьшить количество действий, необходимых пользователю для проведения тестирования, а также дает возможность отказаться от повторяющихся операций. Благодаря этому существенно снижаются трудозатраты на тестирование цифровых электронных устройств. Применение базы данных при автоматизации тестирования позволяет упростить многократное использование ранее разработанных сценариев.

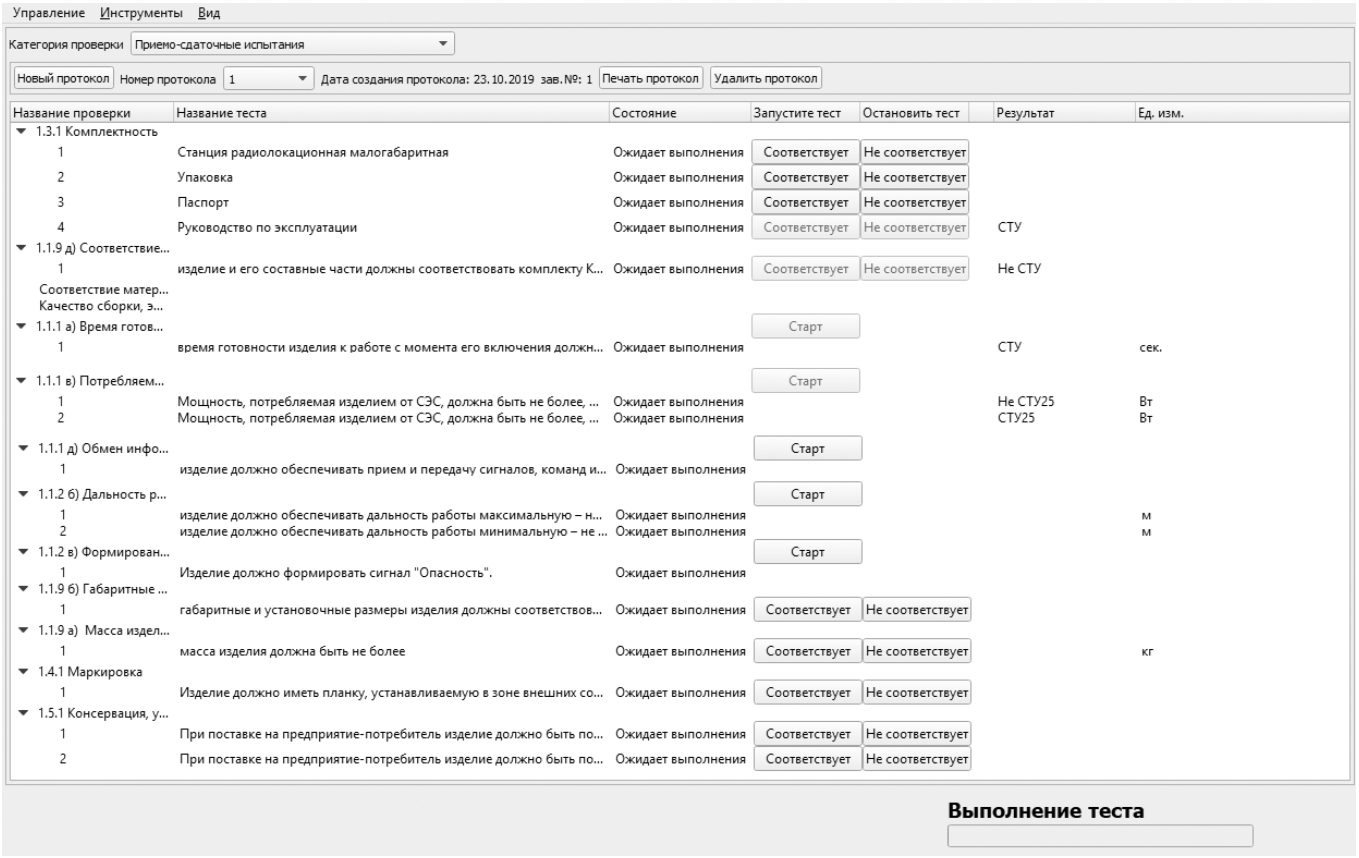


Рисунок. Интерфейс программного обеспечения тестирования

При конфигурации ПО для нового состава стендового оборудования могут быть использованы части скриптов, составленных ранее, что позволяет повысить гибкость при изменении процесса тестирования и/или конфигурации оборудования.

Разработка ПО для проведения автоматизированного тестирования с использованием скриптовых языков программирования может быть легко реализована с помощью широко распространенной кросс-платформенной библиотеки Qt, имеющей подробную документацию с открытым исходным кодом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винниченко И. Автоматизация процессов тестирования. СПб.: Питер, 2005. 203 с.
2. Гребенюк В.М. Оценка целесообразности внедрения автоматизированного тестирования // Вестник евразийской науки. 2013. № 1 (14). С. 13.
3. Qt Script – Qt Documentation [Электронный ресурс]. URL: https://doc.qt.io/qt-5/qtscript-index.html (дата обращения: 25.10.2019).
4. The QML Reference [Электронный ресурс]. URL: https://doc.qt.io/qt-5/qmlreference.html (дата обращения: 25.10.2019).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шуменков Денис Геннадьевич, магистр, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, тел.: 8 (909) 593-44-85, e-mail: shumenkov_dg@radar-mms.com.
Разумов Игорь Николаевич, ведущий инженер, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, e-mail: razumov_in@radar-mms.com.
Здех Вячеслав Леонидович, ведущий инженер, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, e-mail: zdeh_vl@radar-mms.com.

For citation: Shumenkov D.G., Razumov I.N., Zdeh V.L. Use of scripting languages to solve problems of automated testing for testing electronic digital devices. Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 12–15.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-12-15

D.G. Shumenkov, I.N. Razumov, V.L. Zdeh

USE OF SCRIPTING LANGUAGES TO SOLVE PROBLEMS OF AUTOMATED TESTING FOR TESTING ELECTRONIC DIGITAL DEVICES

The article presents the reasons for the need for automated testing of electronic digital devices. One of the ways to automate testing using bench equipment, which uses scripting programming languages, is considered. Advantages and disadvantages of scripting programming languages are given. The mechanism of operation of the software installed on a personal computer as part of the bench equipment during testing using scripts is explained. A method of automated testing is described, in which scripts and the results of the tests are contained in a database. A method for implementing testing using scripting programming languages, using the Qt programming library in a high-level C++language, is considered. Advantages and disadvantages of using the Qt programming library are given. Examples of the implementation of running scripts from testing software in the Qt development environment are given.

Keywords: software, bench equipment, Qt programming library

REFERENCES

1. Vinnichenko I. *Avtomatizatsiya protsessov testirovaniya* [Automation of testing processes]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2005, 203 p. (In Russian).
2. Grebenyuk V.M. Assessment of the feasibility of introducing automated testing. *Vestnik evraziiskoi nauki*, 2013, no. 1 (14), p. 8. (In Russian).
3. Qt Script – Qt Documentation. Available at: https://doc.qt.io/qt-5/qtscript-index.html (accessed 25.10.2019).
4. The QML Reference. Available at: https://doc.qt.io/qt-5/qmlreference.html (accessed 25.10.2019).

AUTHORS

Shumenkov Denis, master, «NPP «Radar mms» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (909) 593-44-85, e-mail: shumenkov_dg@radar-mms.com.
Razumov Igor, principal engineer, «NPP «Radar mms» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, e-mail: razumov_in@radar-mms.com.
Zdeh Vyacheslav, principal engineer, «NPP «Radar mms» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, e-mail: zdeh_vl@radar-mms.com.

Для цитирования: Распределения биоимпеданса в тканях молочной железы с новообразованием (моделирование и эксперимент) / А.В. Ястребов, П.М. Трофимов, О.В. Амосова, А.В. Тишков, И.А. Чиж, В.В. Шаповалов, А.Б. Козырев // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 16–22.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-16-22
УДК 615.47

А.В. Ястребов[1], П.М. Трофимов[1], О.В. Амосова[2], А.В. Тишков[2], И.А. Чиж[2], В.В. Шаповалов[1], А.Б. Козырев[1]

[1] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», [2] Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИОИМПЕДАНСА В ТКАНЯХ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ С НОВООБРАЗОВАНИЕМ (МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ)

В статье приведены результаты моделирования распределения биоимпеданса в ткани молочной железы с целью изучения возможностей экспрессного маммографического обследования для обнаружения злокачественных новообразований и решения актуальных задач персонифицированной медицины. Рассмотрена трехмерная электродинамическая модель ткани молочной железы с кожным покровом и новообразованием. Модель позволяет определить пространственное расположение новообразований в зависимости от их размеров и глубины залегания при различных толщинах кожного покрова при заданных значениях детектирующей чувствительности маммографа. Результаты проведенного моделирования пространственного расположения новообразований подтверждены экспериментальными данными, а также данными биоимпедансных исследований пациентов. Эксперимент проводился на симуляторе ткани молочной железы на основе агар-агара с имитацией новообразования за счет введения шприцевой инъекции солевого раствора.

Ключевые слова: *маммографическое обследование, биоимпедансные измерения, симулятор ткани молочной железы*

Введение

Биоимпедансные измерения являются одним из перспективных неинвазивных методов для разработки систем обнаружения новообразований в биологических тканях человеческого организма, в частности в ткани молочной железы. С целью снижения количества больных раком молочной железы необходимы методы ранней диагностики. Регулярный скрининг среди населения требует привлечения большого количества специалистов, оборудования и организации контроля посещения медицинских учреждений. Таким образом, очевидна критическая потребность в безопасных, безболезненных и экономически эффективных вспомогательных инструментах обследования молочной железы в условиях персонифицированной медицины.

В области биоимпедансной томографии активно ведутся исследования и разрабатываются системы для диагностики рака молочной железы. В частности, особое внимание уделяется скринингу и раннему выявлению злокачественных новообразований [1–3]. Среди зарубежных разработок можно выделить приборы серии TransScan и диагностическую систему Biofield [2]. Отечественные приборы на рынке представлены только биоимпедансным маммографом «МЭИК» [4]. Эти системы являются клиническими приборами, и их использование для обнаружения злокачественных новообразований в тканях молочной железы возможно только в медицинских учреждениях с привлечением специалистов.

Известно, что раковые образования имеют более высокую удельную проводимость, чем здоровые ткани, что позволяет использовать биоимпедансные методы измерения для обнаружения новообразований. Моделирование распределения импеданса в ткани молочной железы с новообразованиями позволяет оценить масштаб измеряемых значений, их локализацию и предельные возможности биоимпедансного метода.

Существует большое количество работ по электродинамическому моделированию ткани молочной железы с новообразованиями для биоимпедансной маммографии. Значительная часть этих работ посвящена электроимпедансной томографии (ЭИТ) – методу объемной визуализации проводимости ткани с помощью решения обратной задачи для уравнений, описывающих электрическое поле

внутри неоднородной проводящей среды. Указанная задача имеет решение при наличии данных о потенциалах, регистрируемых в каждой точке поверхности объекта при всех возможных приложениях зондирующих сигналов [5–15].

Несмотря на несомненную актуальность биоимпедансной томографии, она требует создания устройств, которые обеспечивают возможность измерения потенциалов при приложении зондирующего сигнала к практически любой паре электродов электродной матрицы, расположенных на различных расстояниях друг от друга, и, как правило, с использованием опорного электрода. Наряду с достаточно высокой сложностью системы управления в таких устройствах, время восстановления изображения с дальнейшей его обработкой занимает, как правило, несколько минут и более.

В настоящее время ведется разработка более простых устройств, построенных на принципе измерения величины импеданса только между соседними парами электродов при отсутствии опорного электрода [16], что не позволяет проводить объемную (томографическую) реконструкцию изображения, однако значительно упрощает конструкцию устройства, снижает его стоимость и позволяет использовать его в системах предварительного экспресс-скрининга молочной железы, в том числе в домашних условиях.

В настоящей работе на основе электродинамического моделирования распределения биоимпеданса в ткани молочной железы методом конечных элементов продемонстрирована оценка предельных возможностей портативного маммографа в зависимости от размеров новообразования, глубины его залегания и толщины кожного покрова. Результаты моделирования пространственного расположения новообразований подтверждены экспериментальными данными на симуляторах ткани молочной железы на основе агар-агара и данными биоимпедансных обследований больных.

Моделирование

Трехмерная модель, состоящая из ткани молочной железы, кожного покрова, злокачественного новообразования и электродов, рассчитывалась методом конечных элементов для различных положений и размеров новообразования в виде сферы диаметром d_t и различных толщин кожного покрова h_s. Схематичное изображение исследуемой модели представлено на рис. 1а. Расстояние между электродами a = 14 мм соответствует расстоянию в разработанном приборе [16]. Значения удельной проводимости и диэлектрической проницаемости кожи (σ_s, ε_s), ткани молочной железы (σ_b, ε_b) и новообразования (σ_t, ε_t) приведены на рис. 1а и выбраны на основе усредненных параметров из работ [17–19] для частоты зондирующего сигнала f = 50 кГц.

Очевидно, такая упрощенная модель (отсутствие жирового слоя, кровеносных сосудов и др.) позволяет судить только о тенденциях влияния размеров и глубины расположения новообразований D, поэтому полученные результаты следует рассматривать как идеализированный предел возможной точности измерений. На рис. 1б в качестве примера моделирования приведена картина распределения плотности тока в области новообразования размером 7 мм в соответствии с рис. 1а.

Для определения минимально детектируемого новообразования была построена зависимость импеданса участка ткани между электродами от размера злокачественного новообразования (рис. 2). Приведенные в качестве примера зависимости изменения реальной и мнимой составляющих импеданса от диаметра новообразования нормированы на аналогичные значения составляющих импеданса ткани в отсутствии новообразования. Очевидно, реальная составляющая импеданса значительно более чувствительна к наличию новообразования, и поэтому в дальнейшем все результаты будут рассматриваться именно в этих терминах.

а) б)

Рисунок 1. Схематичное изображение исследуемой модели (а) и пример влияния новообразования размером d_t = 7 мм на распределение плотности тока между электродами (a = 14 мм) (б)

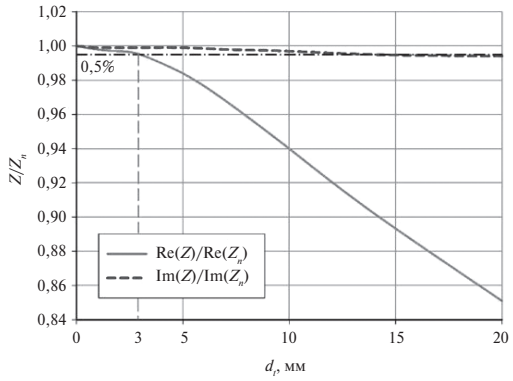


Рисунок 2. Зависимости относительного изменения реальной и мнимой составляющих импеданса от размера новообразования в приповерхностной области

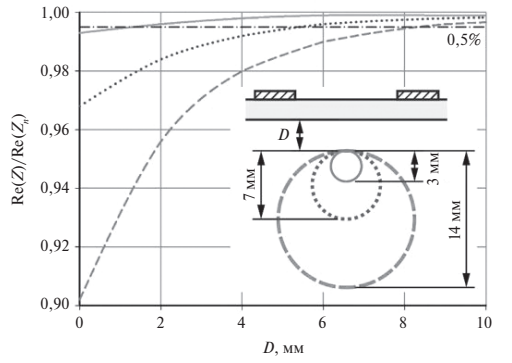
На графике отложен уровень в 0,5%, что соответствует заявленной погрешности измерительного оборудования [20]. Значение диаметра, при котором этот уровень пересекает кривую зависимости, можно считать минимальным диаметром новообразования $d_{t\min} \approx 3$ мм, детектируемого при заданном расстоянии между электродами $a = 14$ мм.

Для определения максимальной глубины обнаружения ($D_{\max}$) была построена зависимость импеданса участка ткани от глубины расположения новообразования (рис. 3а).

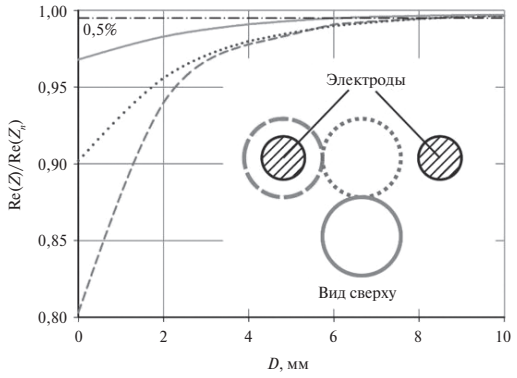
Увеличение отношения $\mathrm{Re}(Z)/\mathrm{Re}(Z_n)$ связано с отдалением включения с большей проводимостью от приповерхностной области под электродами, где сосредоточена максимальная напряженность поля (рис. 1б). Значение глубины D, при которой уровень в 0,5% пересекает кривую зависимости, можно считать максимальной глубиной обнаружения новообразования $D_{\max}$.

На рис. 3а представлена зависимость импеданса от глубины расположения новообразования при толщине кожного покрова $h_s = 1$ мм для различных размеров новообразования d_t. Значения максимальной глубины обнаружения удобнее приводить до центра новообразования ($L_{\max} = D_{\max} + d_t/2$). Тогда, например, $d_t = 14$ мм соответствует $L_{\max} = 15$ мм, $d_t = 7$ мм – $L_{\max} = 8{,}5$ мм, $d_t = 3$ мм – $L_{\max} = 2{,}5$ мм. Обобщения расчетных данных по обнаружению новообразования с размерами $d_t = 3$–15 мм с учетом кожного покрова различной толщины приводят к значениям масштаба глубины, соответствующим $L_{\max} \sim d_t$.

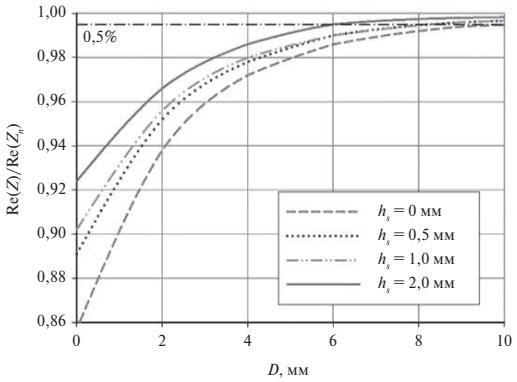
На рис. 3б представлена зависимость импеданса от глубины расположения новообразования диаметром 14 мм для его различного положения относительно электродов. Отличия в расположении практически не влияют на результаты моделирования, соответствующие рис. 3а. Величина $L_{\max}$ при



а)



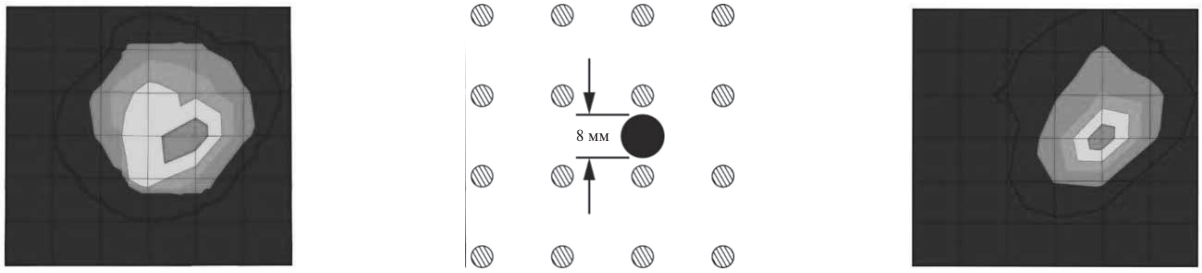
б)



в)

Рисунок 3. Семейство зависимостей относительного изменения импеданса от глубины расположения новообразования: а – для различных размеров новообразования d_t = 3, 7 и 14 мм; б – для различных положений новообразования диаметром 14 мм; в – для различных толщин кожного покрова h_s с новообразованием диаметром 14 мм

различных положениях новообразования неразличима в пределах погрешности. Отличия проявляются только в приповерхностной области. Увеличение чувствительности на 10–15% непосредственно под электродами связано с повышенным значением напряженности поля именно в этой области (рис. 1б).



а) б) в)

Рисунок 4. Распределение проводимости в элементе электродной матрицы 4×4: а – распределение на симуляторе; б – схематичное изображение матрицы и расположение новообразования; в – распределение на модели

На рис. 3в представлена зависимость импеданса от глубины расположения новообразования диаметром 14 мм для различных толщин кожного покрова h_s. Для нулевой толщины кожного покрова $L_{\max}$ = 17 мм, для h_s = 0,5 и 1 мм $L_{\max}$ = 15 мм, для h_s = 2 мм $L_{\max}$ = 13 мм. Очевидно, что при меньшей толщине кожи увеличивается эффективная глубина проникновения поля и, как следствие, максимальная глубина обнаружения новообразования. Обобщение расчетных данных при других размерах новообразования и толщинах кожи до 2 мм подтверждают верность соотношения $L_{\max} \sim d_t$.

Эксперимент

Было проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными измерений, полученных с использованием симулятора на основе агар-агара. Порошкообразный агар-агар растворялся в воде с температурой 90 °С в пластмассовой кювете в концентрации 10 г/л. Удельная проводимость симулятора составляла около 0,06 См/м. Симулятор имел высоту 5 см и площадь основания 100 см^2, что соответствовало размерам модели с новообразованием (рис. 1а). Имитация новообразования в симуляторе осуществлялась за счет введения шприцевой инъекции солевого раствора с концентрацией 3 г/л, обладающего проводимостью примерно в 10 раз большей, чем проводимость агар-агара (около 0,6 См/м). При этом размер имитатора новообразования, расположенного на различных глубинах, можно грубо оценить как близкий к 8 мм.

Измерения на симуляторе проводились прибором [16] с электродной матрицей 8×8. На рис. 4а приведено распределение проводимости симулятора с новообразованием на глубине около 4 мм в области элемента матрицы 4×4. Была рассчитана модель участка ткани без кожного покрова с новообразованием диаметром 8 мм на глубине L = 4 мм с использованием 16 электродов, как показано на рис. 4б (матрица 4×4). Промоделированная картина распределения проводимости (рис. 4в) сравнивалась с экспериментальной картиной, полученной на симуляторе на основе агар-агара.

Рисунок 5. Распределение проводимости правой молочной железы пациентки с раковой опухолью в верхневнутреннем квадранте

На рис. 4а и 4в красным цветом выделена область с наиболее высокой проводимостью, что соответствует месту расположения новообразования. Рассогласование с моделью в распределении цвета связано с растеканием солевого раствора по объему симулятора и расположением электродной матрицы прибора на поверхности симулятора, которое неточно соответствует рис. 4б.

Работоспособность прибора по обнаружению новообразований в молочной железе [16] была проверена на ряде пациенток, в частности, на пациентке с раковой опухолью в верхневнутреннем квадранте (ВВК) правой молочной железы размером 10×7 мм. Распределение нормированной проводимости железы пациентки представлено на рис. 5, что соответствует результатам моделирования для новообразований с d_t = 10 мм на глубинах их расположения вплоть до 10 мм.

Заключение

В работе методом конечных элементов рассчитана трехмерная электродинамическая модель, состоящая из ткани молочной железы, злокачественного новообразования, кожного покрова

и электродов. Моделирование проводилось для различных пространственных расположений новообразований, их размеров и различных толщин кожного покрова. По результатам моделирования были определены размеры минимально детектируемого новообразования, максимальная глубина его обнаружения и предельные возможности прибора.

Обобщение расчетных данных по обнаружению новообразования с размерами d_t = 3–15 мм с учетом кожного покрова различной толщины позволяет оценить значение масштаба глубины, соответствующее $L_{\max} \sim d_t$. Результаты проведенного моделирования пространственного расположения новообразований в ткани молочной железы подтверждены экспериментальными данными на симуляторах ткани молочной железы на основе агар-агара и данными биоимпедансных исследований пациенток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов А.Ю., Короткова М.Е. и др. Семинар по электроимпедансной маммографии. Ярославль: СИМ-техника, 2011. 138 с.
2. Ng E.Y. K., Vinitha Sree S., et al. The use of tissue electrical characteristics for breast cancer detection: a perspective review // Technology in cancer research and treatment. 2008. Vol. 7. No. 4. P. 295–308.
3. Рассказова Е.А., Рожкова Н.И. Скрининг для ранней диагностики рака молочной железы // Исследования и практика в медицине. 2014. Т. 1. № 1. С. 45–51.
4. Пак Д.Д., Рожкова Н.И. и др. Диагностика рака молочной железы с помощью электроимпедансной томографии // Медицинская техника. 2012. № 4 (274). С. 25–28.
5. Hong S., Lee K., et al. A 4.9 mΩ-sensitivity mobile electrical impedance tomography IC for early breast-cancer detection system // IEEE journal of solid-state circuits. 2015. Vol. 50. P. 13.
6. Семченков А.А., Калиниченко А.Н. Использование модели на основе резисторной матрицы для исследования распределения электрического потенциала при электроимпедансной маммографии // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 11. С. 59–63.
7. Sree G., Velvizhi V.K., Sundararajan R. Electric field distribution of malignant breast tissue under needle electrode configuration. 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal, QC. P. 267–270.
8. Soleimani M. Electric network method in direct and inverse electromagnetic computation in electrical impedance tomography. The Fourth International Conference on Computation in Electromagnetics, 2002 (CEM 2002), Bournemouth, UK. P. 2.
9. Ain K., Wibowo R., Soelistiono S. Modeling of electrical impedance tomography to detect breast cancer by finite volume methods // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 853. P. 012001.
10. Ferreira H.R., Bustos H.I. A., Figuerola W.B. Simulation inverse problems of reconstruction of image data using patterned electrical impedance tomography female breast. IEEE16th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), Natal, 2014. P. 1–6.
11. Zhang X. Investigation of 3D electrical impedance mammography systems for breast cancer detection. Doctoral thesis (Ph. D.), University of Sussex, 2015.
12. Zhao M., Wi H., et al. High density trans-admittance mammography development and preliminary phantom tests // Biomedical engineering online. 2012. Vol. 11. No. 75.
13. Hesabgar S.M. Low frequency bio-electrical impedance mammography and dielectric measurement. Electronic Thesis and Dissertation Repository, 2016. 4208.
14. Scholz B., Anderson R. On electrical impedance scanning-principles and simulations // Electromedica. 2000. No. 68. P. 35–44.
15. Кобрисев П.А., Туйкин Т.С., Корженевский А.В. Разработка бесконтактного монитора жизненных показателей человека [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 4. URL: http://jre.cplire.ru/jre/apr17/10/text.pdf (дата обращения: 20.12.2019).
16. Yastrebov A.V., Trofimov P.M., et al. Portable home use mammograph for detection breast tumors. AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2140. Iss. 1. P. 020079.
17. Gabriel C. Compilation of the dielectric properties of body tissues at the RF and microwave frequencies. Physics department, King's college London, 1996. 271 p.
18. Zou Y., Guo Z. A review of electrical impedance techniques for breast cancer detection // Medical Engineering & Physics. 2003. Vol. 25 (2). P. 79–90.
19. Surowiec A.J., Stuchly S.S., et al. Dielectric properties of breast carcinoma and the surrounding tissues // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1988. Vol. 35 (4) P. 257–263.
20. Evaluating the AD5933 1 MSPS, 12-bit impedance converter network analyzer. Evaluating board user guide. Analog Devices, 2017. 28 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ястребов Александр Владимирович, аспирант, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5, тел.: 8 (903) 096-16-42, e-mail: avyastrebov@bk.ru.

Трофимов Павел Максимович, аспирант, инженер, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5, тел.: 8 (965) 034-76-15, e-mail: pavelmtrofimov@gmail.com.

Амосова Ольга Викторовна, студент, ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова», Российская Федерация, 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6–8, тел.: 8 (921) 300-82-45, e-mail: amosova-ol@mail.ru.
Тишков Артем Валерьевич, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой физики, математики и информатики, ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова», Российская Федерация, 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6–8, тел.: 8 (921) 952-91-85, e-mail: artem.tishkov@gmail.com.
Чиж Игорь Александрович, к.м.н., заведующий 5-м онкологическим отделением (маммологии), НИИ Хирургии и неотложной медицины, ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова», Российская Федерация, 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 17, тел.: 8 (911) 920-22-26, e-mail: igorchizh@mail.ru.
Шаповалов Валентин Викторович, д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, тел.: 8 (911) 255-64-52, e-mail: valshapovalov@mail.ru.
Козырев Андрей Борисович, д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, тел.: 8 (921) 931-49-57, e-mail: mlpeltech@gmail.com.

For citation: Yastrebov A.V., Trofimov P.M., Amosova O.V., Tishkov A.V., Chizh I.A., Shapovalov V.V., Kozyrev A.B. Distributions of bioimpedance in breast tissue with neoplasm (modeling and experiment). Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 16–22.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-16-22

A.V. Yastrebov, P.M. Trofimov, O.V. Amosova, A.V. Tishkov, I.A. Chizh, V.V. Shapovalov, A.B. Kozyrev

DISTRIBUTIONS OF BIOIMPEDANCE IN BREAST TISSUE WITH NEOPLASM (MODELING AND EXPERIMENT)

The paper presents the results of modeling the distribution of bioimpedance in breast tissue with the aim of exploring the possibilities of mammographic examination to detect neoplasms and to solve the problems of personalized medicine. A three-dimensional electrodynamic model of breast tissue with skin and neoplasm is considered. The model allows you to determine the spatial location of neoplasms depending on their size, depth at different thicknesses of the skin at given values of the detecting sensitivity of the mammograph. The results of modeling the spatial location of neoplasms are confirmed by experimental data and bioimpedance studies of patients. The experiment was carried out on a breast tissue simulator based on agar-agar with imitation of neoplasm due to the introduction of a syringe injection of saline.

Keywords: mammographic examination, bioimpedance measurements, breast tissue simulator

REFERENCES

1. Karpov A. Yu., Korotkova M.E., et al. *Seminar po elektroimpedansnoi mammografii* [Seminar on electrical impedance mammography]. Yaroslavl, SIM-tekhnika Publ., 2011, 138 p. (In Russian).
2. Ng E.Y. K., Vinitha Sree S., et al. The use of tissue electrical characteristics for breast cancer detection: a perspective review. *Technology in cancer research and treatment,* 2008, vol. 7, no. 4, pp. 295–308.
3. Rasskazova E.A., Rozhkova N.I. Screening for early diagnosis of breast cancer. *Issledovaniya i praktika v meditsine,* 2014, vol. 1, no. 1, pp. 45–51. (In Russian).
4. Pak D.D., Rozhkova N.I., et al. Diagnosis of breast cancer using electrical impedance tomography. *Biomedical Engineering,* 2012, vol. 46, no. 4, pp. 154–157. (In Russian).
5. Hong S., Lee K., et al. A 4.9 mΩ-sensitivity mobile electrical impedance tomography IC for early breast-cancer detection system. *IEEE journal of solid-state circuits,* 2015, vol. 50, p. 13.
6. Semchenkov A.A., Kalinichenko A.N. Using a model based on a resistor matrix to study the distribution of electric potential in electrical impedance mammography. *Biomeditsinskaya radioelektronika,* 2010, no. 11, pp. 59–63. (In Russian).
7. Sree G., Velvizhi V.K., Sundararajan R. Electric field distribution of malignant breast tissue under needle electrode configuration. 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal, QC, pp. 267–270.
8. Soleimani M. Electric network method in direct and inverse electromagnetic computation in electrical impedance tomography. The Fourth International Conference on Computation in Electromagnetics, 2002 (CEM 2002), Bournemouth, UK, p. 2.
9. Ain K., Wibowo R., Soelistiono S. Modeling of electrical impedance tomography to detect breast cancer by finite volume methods. *Journal of Physics: Conference Series,* 2017, vol. 853, p. 012001.
10. Ferreira H.R., Bustos H.I. A., Figuerola W.B. Simulation inverse problems of reconstruction of image data using patterned electrical impedance tomography female breast. IEEE16th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), Natal, 2014, pp. 1–6.
11. Zhang X. *Investigation of 3D electrical impedance mammography systems for breast cancer detection.* Doctoral thesis (Ph. D.), University of Sussex, 2015.
12. Zhao M., Wi H., et al. High density trans-admittance mammography development and preliminary phantom tests. *Biomedical engineering online,* 2012, vol. 11, no. 75.
13. Hesabgar S.M. *Low frequency bio-electrical impedance mammography and dielectric measurement.* Electronic Thesis and Dissertation Repository, 2016, 4208.
14. Scholz B., Anderson R. On electrical impedance scanning-principles and simulations. *Electromedica,* 2000, no. 68, pp. 35–44.

15. Kobrisev P. A., Tuikin T. S., Korzhenevsky A. V. Development of a non-contact monitor of human vital indicators. *Zhurnal radioelektroniki,* 2017, no 4. Available at: http://jre.cplire.ru/jre/apr17/10/text.pdf (accessed 20.12.2019).
16. Yastrebov A. V., Trofimov P. M., et al. Portable home use mammograph for detection breast tumors. AIP Conference Proceedings, 2019, vol. 2140, iss. 1, p. 020079.
17. Gabriel C. *Compilation of the dielectric properties of body tissues at the RF and microwave frequencies.* Physics department, King's college London, 1996, 271 p.
18. Zou Y., Guo Z. A review of electrical impedance techniques for breast cancer detection. *Medical Engineering & Physics,* 2003, vol. 25 (2), pp. 79–90.
19. Surowiec A. J., Stuchly S. S., et al. Dielectric properties of breast carcinoma and the surrounding tissues. *IEEE Trans. Biomed. Eng.,* 1988, vol. 35 (4), pp. 257–263.
20. *Evaluating the AD5933 1 MSPS, 12-bit impedance converter network analyzer.* Evaluating board user guide. Analog Devices, 2017, 28 p.

AUTHORS

Yastrebov Alexandr, graduate student, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, tel.: +7 (903) 096-16-42, e-mail: avyastrebov@bk.ru.
Trofimov Pavel, graduate student, engineer, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, tel.: +7 (965) 034-76-15, e-mail: pavelmtrofimov@gmail.com.
Amosova Olga, student, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6–8, Lva Tolstogo St., Saint-Petersburg, 197022, Russian Federation, tel.: +7 (921) 300-82-45, e-mail: amosova-ol@mail.ru.
Tishkov Artem, Ph. D., head of physics, mathematics and informatics department, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6–8, Lva Tolstogo St., Saint-Petersburg, 197022, Russian Federation, tel.: +7 (921) 952-91-85, e-mail: artem.tishkov@gmail.com.
Chizh Igor, Ph. D., head of the 5th oncology department (mammology), Research Institute of Surgery and Emergency Medicine, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 17, Lva Tolstogo St., Saint-Petersburg, 197022, Russian Federation, tel.: +7 (911) 920-22-26, e-mail: igorchizh@mail.ru.
Shapovalov Valentin, D. Sc., professor, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, tel.: +7 (911) 255-64-52, e-mail: valshapovalov@mail.ru.
Kozyrev Andrey, D. Sc., professor, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, tel.: +7 (921) 931-49-57, e-mail: mlpeltech@gmail.com.

Для цитирования: Исследование влияния параметров техпроцесса на электрофизические характеристики полевого транзистора с барьером Шоттки с применением приборно-технологического моделирования / А. А. Попов, Д. В. Билевич, А. С. Сальников, А. А. Калентьев // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 23–30.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-23-30
УДК 621.382.323

А. А. Попов[1], Д. В. Билевич[1], А. С. Сальников[1], А. А. Калентьев[1]

[1] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХПРОЦЕССА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

В статье представлены результаты исследования физико-технологической модели типового полевого транзистора с барьером Шоттки (ПТШ). Проведено моделирование пробивных характеристик ПТШ при различных параметрах подзатворного углубления. Представлено сравнение диаграмм скорости генерации горячих носителей для плоской структуры ПТШ и структуры с подзатворным углублением. Получена зависимость напряжения пробоя стока от глубины подзатворного углубления. Также в работе предложен новый подход, позволяющий установить взаимосвязь между параметрами ионной имплантации контактных областей и канала ПТШ и внутренними емкостями малосигнальной эквивалентной схемы транзистора. Данный подход основан на перспективном направлении контроля, называемом виртуальной метрологией, где параметры технологического процесса используются для предсказывания критических параметров, характеризующих его результат. Для реализации данного подхода построены предиктивные модели на основе четырех популярных методов машинного обучения: линейной регрессии, машины опорных векторов, искусственной нейронной сети и композиции решающих деревьев.

Ключевые слова: *физико-технологическая модель, эффект пробоя, виртуальная метрология, машинное обучение*

Введение

Полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ) на основе арсенида галлия широко используются в монолитных интегральных схемах быстродействующих переключателей и усилителей мощности, предназначенных для создания устройств беспроводной передачи данных, сотовой связи, радиолокации и радионавигации. Особенное значение имеют мощные ПТШ, так как на их основе можно конструировать как аналоговые, так и цифровые системы радиосвязи.

Технология производства ПТШ складывается из множества технологических операций, для качественного проведения которых требуется современное оборудование. Однако, ввиду дороговизны проведения экспериментов по отладке технологии изготовления полупроводниковых приборов, в современной практике используются методы физико-технологического моделирования с целью предварительной оценки параметров технологических процессов и поиска оптимальных конструкционных решений для отдельных элементов приборов.

Например, при конструировании мощных ПТШ необходимо обеспечить высокие значения напряжения пробоя стока и тока насыщения [1]. В свою очередь, пробивное напряжение сток-исток в значительной степени зависит от базовой структуры ПТШ. Большинство серийных малошумящих ПТШ имеют структуру плоского типа [2], но при попытке реализовать мощные ПТШ данного типа было установлено, что приборы с такой структурой обладают низкими напряжениями пробоя стока и не обеспечивают стабильную работу [3]. Впоследствии были предложены различные варианты структур и технологии их получения, позволяющие значительно улучшить мощностные характеристики транзисторов [4–7]. Однако предложенные ранее конфигурации структур мощных ПТШ были получены

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00293.

с помощью эвристических и опытных подходов, в которых физическое обоснование улучшения мощностных параметров практически не представлено. В данной работе для исследования эффекта пробоя стока в распространенной структуре мощного ПТШ с подзатворным углублением использовалось физико-технологическое моделирование, что позволило детально рассмотреть процессы генерации горячих носителей в области затвора со стороны стока.

Наряду с особенностями конструкций полупроводниковых приборов особое внимание уделяется контролю технологических процессов их изготовления. На протяжении всего производственного цикла измеряются наиболее критичные параметры, например, толщина пленки после CVD-осаждения [8] или ошибка совмещения фотошаблона и подложки при проведении литографии [9]. От качества контроля критичных параметров зависят такие важные показатели производительности, как объем производства и процент выхода годной продукции, а также пропускная способность производственной линии.

Согласно [10], существуют две основные стратегии измерения ключевых параметров процесса. Первая стратегия реализуется в виде интегрированного метрологического модуля (ИММ), когда прецизионное измерительное оборудование устанавливается непосредственно в технологическую установку. Вторая стратегия предполагает, что полупроводниковые пластины после проведения определенного технологического процесса отправляются на отдельный метрологический участок.

При использовании ИММ условия и параметры техпроцесса непрерывно корректируются, поскольку контролю подвергаются все обрабатываемые подложки. Несмотря на высокую стоимость и продолжительность производственного цикла, данный подход обеспечивает качественный контроль техпроцесса и используется на наиболее критичных этапах всего технологического маршрута [11]. В случае измерения параметров процесса на отдельном метрологическом участке используются лишь некоторые пластины из партии, так как на измерение критичных параметров за пределами технологического оборудования требуется больше времени. В зависимости от технологического оборудования, требований к продукту и важности процесса специалист по контролю устанавливает определенную частоту выборки контрольных пластин [12]. Однако при использовании такой схемы контроля параметры процесса обновляются не сразу после измерения критического параметра, что затрудняет своевременное обнаружение нарушений в техпроцессе и сказывается на качестве итогового продукта [13]. Для обеспечения баланса между затрачиваемым временем, количеством контролируемых пластин и стоимостью операций контроля была предложена виртуальная метрология.

Виртуальная метрология использует математические модели и доступные данные о техпроцессе для оценки и контроля критических параметров. За последние десять лет было предложено множество подходов и сфер применения виртуальной метрологии в полупроводниковом производстве. Наибольшее применение данный подход нашел в технологии CVD-осаждения, где для построения предсказательной модели использовались следующие методы: нейронные сети на основе радиальной базисной функции [14]; множественная линейная регрессия [13]; рекуррентные нейронные сети [15]; композиция решающих деревьев [16]. Тем не менее впоследствии виртуальная метрология стала применяться и в других технологических процессах, включая химико-механическую полировку [17], травление [18] и литографию [19].

В данном исследовании подход виртуальной метрологии был распространен на параметры малосигнальной модели ПТШ. Традиционно такие модели ПТШ используются для проектирования интегральных схем, а также для исследования и корректирования параметров технологического процесса. Параметры моделей рассчитываются из результатов измерений электрофизических характеристик транзистора и далее используются в качестве индикаторов при настройке параметров процесса. Основываясь на предложенных ранее принципах виртуальной метрологии, в данной работе исследовалась взаимосвязь между параметрами имплантации канала и контактных областей ПТШ и параметрами его малосигнальной модели. Для этого с помощью физико-технологического и приборного моделирования были реализованы процесс формирования канала и контактных областей ПТШ, а также расчет параметров рассеяния транзистора.

Физико-технологическая модель ПТШ

Для проведения численных экспериментов с помощью приборного моделирования была реализована типовая структура ПТШ на подложке GaAs. Для проведения экспериментов по построению предиктивных моделей также было реализовано физико-технологическое моделирование формирования канала и контактных областей ПТШ. На первом этапе проводилось моделирование процесса имплантации ионов бериллия для обеспечения необходимой исходной концентрации акцепторной примеси в подложке. Канал *n*-типа был сформирован путем имплантации ионов кремния. Далее был сформирован затвор из титана длиной 1 мкм. Сильнолегированные контактные области стока и истока

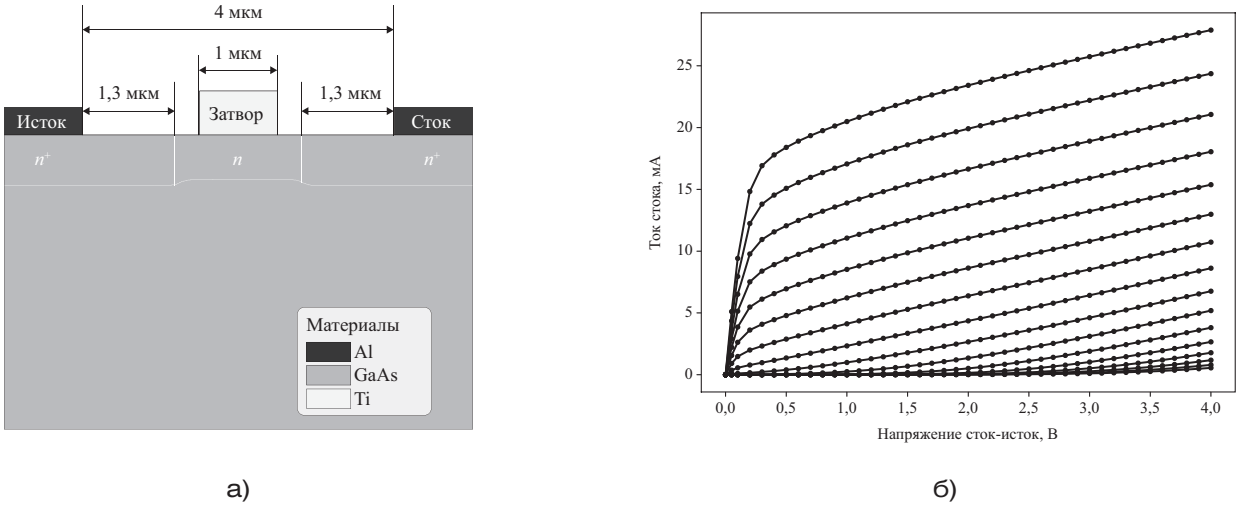
были реализованы с помощью ионной имплантации кремния. В качестве материала электродов истока и стока использовался алюминий. Итоговая структура ПТШ с характерными геометрическими размерами, а также результаты моделирования семейства выходных вольт-амперных характеристик представлены на рис. 1.

Моделирование пробивных характеристик ПТШ

Реализованная физико-технологическая модель использовалась для исследования влияния параметров подзатворного углубления на пробивные характеристики ПТШ. Для этого в ходе экспериментов в исходной структуре ПТШ формировалось подзатворное углубление (рецесс) и рассчитывалось напряжение пробоя стока. Структура ПТШ с рецессом глубиной 0,27 мкм представлена на рис. 2.

Для моделирования пробивных характеристик было выбрано напряжение $U_{ЗИ}$ = –3 В, обеспечивающее полное обеднение канала транзистора. Напряжение $U_{СИ}$ изменялось в диапазоне от 0 до 20 В. Явление пробоя стока регистрировалось при значениях тока стока $I_{СИ}$, превышающих 0,1 мА. Результаты моделирования пробивных характеристик структур ПТШ с различной глубиной рецесса представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что напряжение пробоя стока для плоской структуры ПТШ составляет 6,1 В, в то время как для структур ПТШ с рецессом явление пробоя стока возникает при больших значениях напряжения $U_{СИ}$. Поскольку явление пробоя стока связано с механизмом ударной ионизации, были проанализированы диаграммы, отображающие скорость генерации носителей заряда G для двух типов структур ПТШ при напряжении $U_{СИ}$ = 6,1 В.



а) б)

Рисунок 1. Структура поперечного сечения полевого транзистора с затвором Шоттки (а) и семейство выходных вольт-амперных характеристик при $U_{ЗИ}$ от –1,2 В до 0,4 В с шагом 0,1 В (б): n^+ – сильнолегированные контактные области истока/стока; n – область канала n-типа

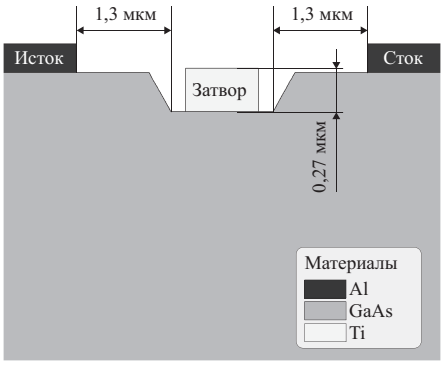


Рисунок 2. Структура моделируемого полевого транзистора с затвором Шоттки с рецессом

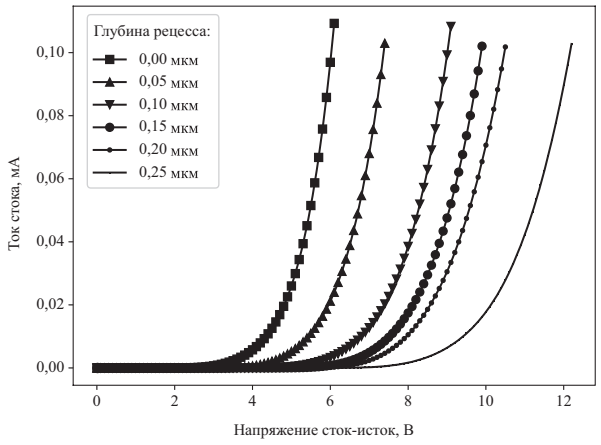
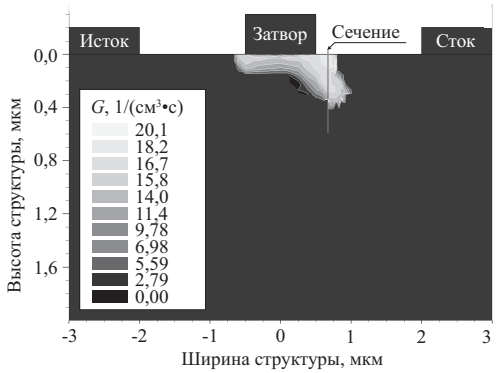
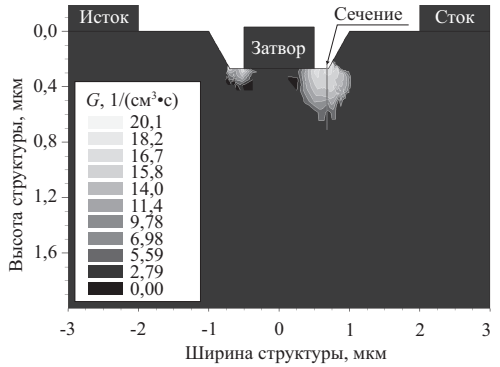


Рисунок 3. Пробивные характеристики стока для структур полевого транзистора с затвором Шоттки с различной глубиной рецесса

Для каждой из структур был построен график скорости генерации носителей в результате ударной ионизации в сечении, как показано на рис. 4.



а)



б)

Рисунок 4. Диаграммы скорости генерации носителей заряда в результате ударной ионизации при $U_{СИ}$ = 6,1 В в плоской структуре (а) полевого транзистора с затвором Шоттки и в структуре с рецессом глубиной 0,27 мкм (б): *G* – скорость генерации горячих носителей в результате ударной ионизации

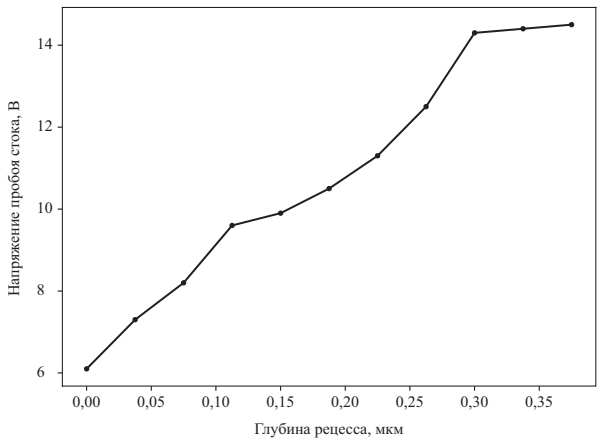


Рисунок 5. Зависимость пробивного напряжения стока от глубины рецесса

При указанном напряжении максимальное значение G для плоской структуры ПТШ составляет $3{,}6 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$/с, в то время как для структуры с рецессом глубиной 0,27 мкм скорость генерации носителей при $U_{СИ}$ = 6,1 В не превышает $3{,}3 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$/с.

Полученные значения скорости генерации носителей вблизи области пространственного заряда барьера Шоттки также свидетельствуют о том, что при $U_{СИ}$ = 6,1 В в структуре ПТШ с рецессом явление пробоя стока не наблюдается в отличие от плоской структуры ПТШ. Повышение пробивного напряжения с увеличением глубины рецесса может быть связано с уменьшением концентрации носителей в активном слое транзистора, поскольку в результате ионной имплантации концентрация примеси в канале распределяется неравномерно.

При исследовании влияния подзатворного углубления на пробивные характеристики ПТШ также была получена зависимость, представленная на рис. 5. Характер полученной зависимости пробивного напряжения стока от глубины рецесса соответствует представленным ранее практическим результатам [7]. С увеличением глубины рецесса пробивное напряжение стока возрастает и выходит в насыщение, поскольку глубина рецесса становится соизмеримой или большей толщины активного слоя транзистора, где концентрация носителей изменяется незначительно.

Построение предиктивных моделей

Для построения предиктивных моделей, позволяющих выявить взаимосвязь между параметрами ионной имплантации и характеристиками малосигнальной эквивалентной схемы ПТШ, также использовалась реализованная физико-технологическая модель ПТШ. В частности, был проведен малосигнальный анализ модели ПТШ в диапазоне частот от 0,01 до 12 ГГц. Экстракция параметров эквивалентной схемы [20], изображенной на рис. 6, проводилась с использованием результатов моделирования параметров рассеяния в рабочей точке $U_{СИ}$ = 3 В, $U_{ЗИ}$ = 0,2 В. Представленная эквивалентная схема соответствует внутренней схеме транзистора, где внешние паразитные элементы исключены, так как в процессе приборного моделирования не учитывается влияние контактных площадок и подводящих линий.

Для установления взаимосвязи между параметрами эквивалентной схемы и техпроцесса изготовления транзистора была проведена серия экспериментов с различными значениями дозы и энергии всех этапов ионной имплантации. Параметры эквивалентной схемы транзистора рассчитывались из смоделированных параметров рассеяния. Далее в целях демонстрации все формулы и результаты построения предиктивных моделей будут

представлены только для емкостей эквивалентной схемы. Однако подобные эксперименты могут быть проведены с использованием всех внутренних параметров. Емкости эквивалентной схемы могут быть рассчитаны из матрицы малосигнальных *Y*-параметров, используя следующие выражения:

$$C_{ЗИ} = \frac{1}{\omega \operatorname{Im}\left(\frac{1}{Y_{11}+Y_{12}}\right)}, \quad (1)$$

$$C_{ЗС} = \frac{1}{\omega \operatorname{Im}\left(\frac{1}{Y_{12}}\right)}, \quad (2)$$

$$C_{СИ} = \frac{\operatorname{Im}\left(Y_{12}+Y_{22}\right)}{\omega}, \quad (3)$$

где ω – циклическая частота.

Используемые для расчета *Y*-параметры могут быть получены путем пересчета параметров рассеяния с помощью известных соотношений. Приведенные выражения позволяют рассчитать значения емкостей в каждой частотной точке. Для получения окончательного значения емкости в данной работе использовалось обыкновенное усреднение всех рассчитанных значений по частоте.

Входными данными для обучения моделей выступали параметры ионной имплантации, которые изменялись в ходе физико-технологического моделирования. Полученные в результате экстракции значения емкостей $C_{ЗИ}$, $C_{ЗС}$ и $C_{СИ}$ использовались в качестве ответов (выходных параметров). Предиктивная модель связывает между собой значения входных параметров и ответов, используя для этого популярные в области виртуальной метрологии регрессионные методы: линейную регрессию, машину опорных векторов, искусственную нейронную сеть и композицию решающих деревьев. Таким образом, каждый из указанных методов является математической основой работы для своей предиктивной модели.

В случае построения предиктивных моделей каждый из перечисленных методов машинного обучения представляет собой модель в виде черного ящика, имеющую входные и выходные параметры. Задача обучения сводится к определению таких внутренних параметров модели, при использовании которых черный ящик преобразует входные данные в выходные с минимально допустимым значением ошибки. Таким образом, для обучения модели требуется некоторая обучающая выборка, в которой содержатся входные данные (признаки) и соответствующие им выходные данные (ответы). Следует отметить, что для каждого из методов машинного обучения используется определенный алгоритм расчета внутренних параметров модели.

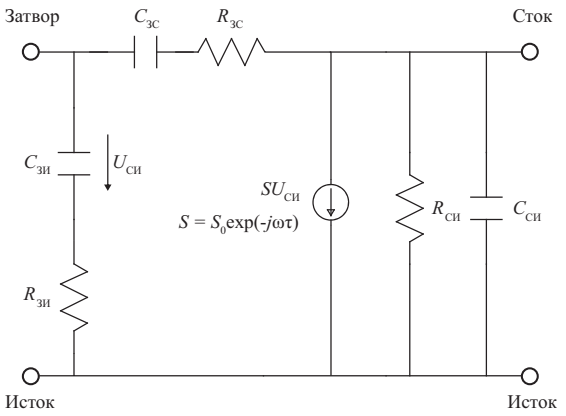
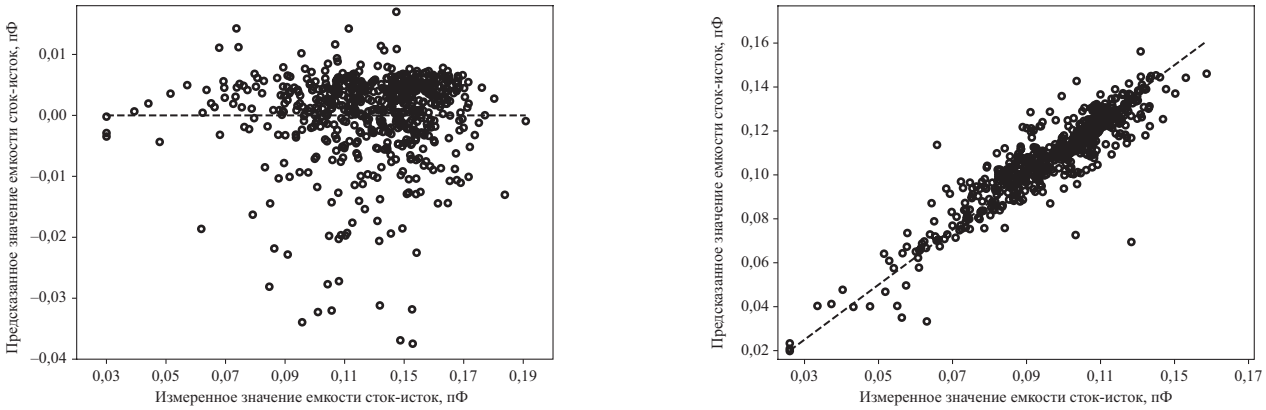


Рисунок 6. Малосигнальная эквивалентная схема: *S* – крутизна транзистора; S_0 – крутизна транзистора на постоянном токе; ω – циклическая частота; τ – время задержки

Например, в случае линейной регрессии наиболее распространенным алгоритмом обучения является метод наименьших квадратов, в то время как для искусственной нейронной сети используют алгоритм обратного распространения ошибки.

Для того чтобы порядки входных величин не влияли на результат обучения, было применено автошкалирование данных. В ходе исследования было установлено, что для обучения адекватных регрессионных моделей также необходимо применять шкалирование выходных данных, если они имеют малый порядок величин. На рис. 7 представлено сравнение результатов обучения регрессионной модели на основе искусственной нейронной сети. В первом случае (рис. 7а), когда обучение проводилось без предварительного шкалирования ответов, модель не способна предсказывать значения емкостей, рассчитанные из смоделированных параметров рассеяния. Во втором случае (рис. 7б) коэффициент детерминации обученной модели $R^2 = 0{,}78$, что подтверждает, что полученная модель способна описывать взаимосвязь между параметрами ионной имплантации и значениями емкостей малосигнальной модели. Для повышения точности моделей был проведен сеточный поиск оптимальных параметров, при которых достигается наибольшее значение коэффициента детерминации. В процессе поиска использовалась трехкратная кросс-валидация во избежание переобучения модели.

После определения оптимальных параметров вся исходная выборка данных была разделена на обучающую и контрольную. Обучение моделей с оптимальными параметрами проводилось с использованием обучающей выборки. Оценка качества моделей осуществлялась с помощью данных контрольной выборки по значению коэффициента детерминации R^2. В таблице представлены значения R^2 для всех



а) б)

Рисунок 7. Результат обучения регрессионной модели на основе нейронной сети без предварительного шкалирования ответов (а) и с предварительным шкалированием ответов (б)

регрессионных моделей с оптимальными параметрами, полученными в результате сеточного поиска.

Анализ полученных значений коэффициента детерминации показывает, что нелинейные методы регрессии способны установить взаимосвязь между параметрами ионной имплантации и емкостью $C_{СИ}$, поскольку каждая из нелинейных предиктивных моделей обладает коэффициентом детерминации более 0,75. В то же время наиболее точным среди всех использованных методов является искусственная нейронная сеть, обученная с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют, что данных о техпроцессе ионной имплантации недостаточно для установления взаимосвязи между параметрами процесса и значениями емкостей $C_{ЗС}$ и $C_{ЗИ}$. В дальнейшем предложенный подход может быть исследован с применением данных о других техпроцессах, применяющихся при изготовлении ПТШ на основе GaAs, а также с помощью генерации новых признаков для обучения предиктивной модели на основе уже имеющихся данных.

Заключение

В работе представлены результаты физико-технологического и приборного моделирования типового GaAs ПТШ. Полученная модель использовалась для исследования пробивных характеристик транзистора, а также для установления взаимосвязи между параметрами процесса ионной имплантации и параметрами малосигнальной эквивалентной схемы. В ходе численных экспериментов была определена максимальная глубина рецесса, влияющая на повышение пробивного напряжения стока. Также было установлено, что максимальная скорость генерации горячих носителей в области пространственного заряда барьера Шоттки для плоской структуры ПТШ значительно выше по сравнению со скоростью генерации в структуре с рецессом. Используя данные, полученные в ходе моделирования процесса ионной имплантации и малосигнального анализа физико-технологической модели, были обучены регрессионные методы на основе четырех наиболее популярных методов машинного обучения. Установлено, что нелинейные регрессионные модели способны выявлять взаимосвязь между параметрами ионной имплантации и значениями емкости $C_{СИ}$, полученной в результате экстракции параметров малосигнальной эквивалентной схемы транзистора. Дальнейшие исследования будут направлены на выявление взаимосвязей между данными о других технологических процессах и остальными параметрами малосигнальной эквивалентной схемы.

Таблица. Коэффициент детерминации полученных регрессионных моделей для различных емкостей

Тип емкости малосигнальной модели	Значения коэффициента детерминации R^2			
	Линейная регрессия	Машина опорных векторов	Искусственная нейронная сеть	Композиция решающих деревьев
$C_{СИ}$	0,56	0,76	0,86	0,79
$C_{ЗС}$	0,03	0,006	0,51	0,21
$C_{ЗИ}$	0,004	0,17	0,83	0,49

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drukier I., Wade P. C., Thompson J. W. A high power 15GHz GaAs FET. 9th European Microwave Conference, 1979. Brighton, UK. P. 282–286.
2. Ogawa M., et al. Submicron single-gate and dual-gate GaAs MESFET's with improved low noise and high gain performance // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1976. Vol. 24. No. 6. P. 300–305.
3. Fukuta M., et al. Mesh source type microwave power FET. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. Philadelphia, PA, USA, 1973. P. 84–85.
4. Fukuta M., et al. X-band GaAs Schottky barrier power FET with a high drain source breakdown voltage. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of technical papers. Philadelphia, PA, USA, 1976. P. 166–167.
5. Stoneham E., Tan T. S., Gladstone J. Fully ion implanted GaAs power FETs. International Electron Devices Meeting. Washington, DC, USA, 1977. P. 330–333.
6. Hasegawa F., et al. GaAs power MEWFETs with a simplified recess structure. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of technical papers. San Francisco, CA, USA, 1978. P. 118–119.
7. Furutsuka T., et al. GaAs power m. e. s. f. e. t. s. with a graded recess structure // Electron. Lett. 1979. Vol. 15. No. 14. P. 417–418.
8. Kim S. J., et al. Thickness control of chemical vapor deposition-grown graphene film by oxygen plasma etching with recycled use of Ni catalyst // J. Nanosci. Nanotechnol. 2017. Vol. 17. No. 7. P. 4907–4913.
9. Maas J., et al. YieldStar: a new metrology platform for advanced lithography control. Proc. SPIE7985, 27th European Mask and Lithography Conference, 2011. 79850H.
10. Jebri M. A., et al. The Impact of the virtual metrology on a run-to-run control for a chemical mechanical planarization process // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50. No. 1. P. 6154–6159.
11. Ho W. K., et al. Integrated metrology and processes for semiconductor manufacturing. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005 (IECON2005). 6 p.
12. Elliott R. C., et al. Critical dimension sample planning for sub-0.25 micron processes. 10th Annual IEEE/SEMI. Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, 1999. P. 139–142.
13. Pan J. C.-H., Tai D. H. Implementing virtual metrology for in-line quality control in semiconductor manufacturing // Int. J. Syst. Sci. 2009. Vol. 40. No. 5. P. 461–470.
14. Lin T.-H., et al. A virtual metrology scheme for predicting CVD thickness in semiconductor manufacturing. Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006 (ICRA 2006). P. 1054–1059.
15. Su Y.-C., et al. Accuracy and real-time considerations for implementing various virtual metrology algorithms // IEEE Trans. Semicond. Manuf. 2008. Vol. 21. No. 3. P. 426–434.
16. Besnard J., et al. Virtual metrology modeling for CVD film thickness // Int. J. Control Sci. Eng. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 26–33.
17. Jebri M.A ., et al. Virtual metrology applied in run-to-run control for a chemical mechanical planarization process // J. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 783. P. 012042.
18. Lynn S. A., MacGearailt N., Ringwood J. V. Real-time virtual metrology and control for plasma etch // J. Process Control. 2012. Vol. 22. No. 4. P. 666–676.
19. Kang P., et al. Virtual metrology for run-to-run control in semiconductor manufacturing // Expert Syst. Appl. 2011. Vol. 38. No. 3. P. 2508–2522.
20. Rorsman N., et al. Accurate small-signal modeling of HFET's for millimeter-wave applications // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1996. Vol. 44. No. 3. P. 432–437.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Попов Артем Александрович, младший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел.: 8 (913) 880-78-12, e-mail: artem.a.popov@tusur.ru.

Билевич Дмитрий Вячеславович, младший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел.: 8 (983) 053-03-63, e-mail: dmitrii.v.bilevich@tusur.ru.

Сальников Андрей Сергеевич, к. т. н., доцент, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел.: 8 (913) 866-44-65, e-mail: andrei.salnikov@main.tusur.ru.

Калентьев Алексей Анатольевич, к. т. н., старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел.: 8 (923) 408-04-08, e-mail: aleksei.a.kalentev@tusur.ru.

For citation: Popov A. A., Bilevich D. V., Salnikov A. S., Kalentyev A. A. A study of technology parameters influence on the electrophysical characteristics of a MESFET using TCAD simulations. Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 23–30.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-23-30

A. A. Popov, D. V. Bilevich, A. S. Salnikov, A. A. Kalentyev

A STUDY OF TECHNOLOGY PARAMETERS INFLUENCE ON THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF A MESFET USING TCAD SIMULATIONS

The research results of the TCAD model of a typical MESFET are considered. Modeling of breakdown IV-curves with various parameters of a gate recess was carried out and corresponding diagrams for impact ionization rate of hot carriers both in flat and

recessed MESFET structures were derived. As a result, a curve of breakdown drain voltage versus recess depth was obtained. Also, a new approach to determine an interrelationship between ion implantation parameters of the MESFET channel and contact regions and the intrinsic capacitances of a transistor small-signal model is demonstrated. The approach is based on the promising process control direction called virtual metrology, where critical process variables are predicted using input process parameters such as sensor data. In order to implement a new approach, the four predictive models were built using the following popular machine learning algorithms: linear regression, support vector regression, artificial neural network and decision tree ensembles.

Keywords: MESFET, TCAD model, breakdown, virtual metrology, machine learning

REFERENCES

1. Drukier I., Wade P. C., Thompson J. W. A high power 15GHz GaAs FET. 9th European Microwave Conference, 1979, Brighton, UK, pp. 282–286.
2. Ogawa M., et al. Submicron single-gate and dual-gate GaAs MESFET's with improved low noise and high gain performance. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech,* 1976, vol. 24, no. 6, pp. 300–305.
3. Fukuta M., et al. Mesh source type microwave power FET. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. Philadelphia, PA, USA, 1973, pp. 84–85.
4. Fukuta M., et al. X-band GaAs Schottky barrier power FET with a high drain source breakdown voltage. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of technical papers. Philadelphia, PA, USA, 1976, pp. 166–167.
5. Stoneham E., Tan T. S., Gladstone J. Fully ion implanted GaAs power FETs. International Electron Devices Meeting, Washington, DC, USA, 1977, pp. 330–333.
6. Hasegawa F., et al. GaAs power MEWFETs with a simplified recess structure. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of technical papers. San Francisco, CA, USA, 1978, pp. 118–119.
7. Furutsuka T., et al. GaAs power m. e. s.f. e. t.s. with a graded recess structure. *Electron. Lett.,* 1979, vol. 15, no. 14, pp. 417–418.
8. Kim S. J., et al. Thickness control of chemical vapor deposition-grown graphene film by oxygen plasma etching with recycled use of Ni catalyst. *J. Nanosci. Nanotechnol.,* 2017, vol. 17, no. 7, pp. 4907–4913.
9. Maas J., et al. YieldStar: a new metrology platform for advanced lithography control. Proc. SPIE7985, 27th European Mask and Lithography Conference, 2011, 79850H.
10. Jebri M. A., et al. The Impact of the virtual metrology on a run-to-run control for a chemical mechanical planarization process. *IFAC-PapersOnLine,* 2017, vol. 50, no. 1, pp. 6154–6159.
11. Ho W. K., et al. Integrated metrology and processes for semiconductor manufacturing. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005 (IECON2005), 6 p.
12. Elliott R. C., et al. Critical dimension sample planning for sub-0.25 micron processes. 10th Annual IEEE/SEMI, Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, 1999, pp. 139–142.
13. Pan J. C.-H., Tai D. H. Implementing virtual metrology for in-line quality control in semiconductor manufacturing. *Int. J. Syst. Sci.,* 2009, vol. 40, no. 5, pp. 461–470.
14. Lin T.-H., et al. A virtual metrology scheme for predicting CVD thickness in semiconductor manufacturing. Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006 (ICRA 2006), pp. 1054–1059.
15. Su Y.-C., et al. Accuracy and real-time considerations for implementing various virtual metrology algorithms. *IEEE Trans. Semicond. Manuf.,* 2008, vol. 21, no. 3, pp. 426–434.
16. Besnard J., et al. Virtual metrology modeling for CVD film thickness. *Int. J. Control Sci. Eng.,* 2012, vol. 2, no. 3, pp. 26–33.
17. Jebri M. A ., et al. Virtual metrology applied in run-to-run control for a chemical mechanical planarization process. *J. Phys. Conf. Ser.,* 2017, vol. 783, p. 012042.
18. Lynn S. A., MacGearailt N., Ringwood J. V. Real-time virtual metrology and control for plasma etch. *J. Process Control,* 2012, vol. 22, no. 4, pp. 666–676.
19. Kang P., et al. Virtual metrology for run-to-run control in semiconductor manufacturing. *Expert Syst. Appl.,* 2011, vol. 38, no. 3, pp. 2508–2522.
20. Rorsman N., et al. Accurate small-signal modeling of HFET's for millimeter-wave applications. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.,* 1996, vol. 44, no. 3, pp. 432–437.

AUTHORS

Popov Artem, junior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation, tel.: +7 (913) 880-78-12, e-mail: artem.a.popov@tusur.ru.
Bilevich Dmitry, junior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation, tel.: +7 (983) 053-03-63, e-mail: dmitrii.v.bilevich@tusur.ru.
Salnikov Andrei, Ph. D., associate professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation, tel.: +7 (913) 866-44-65, e-mail: andrei.salnikov@main.tusur.ru.
Kalentyev Alexey, Ph. D., senior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation, tel.: +7 (923) 408-04-08, e-mail: aleksei.a.kalentev@tusur.ru.

Для цитирования: Митьков А.С., Рубанович М.Г. Модульные сверхвысокочастотные аттенюаторы высокого уровня мощности // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 31–37.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-31-37
УДК 621.375.54

А.С. Митьков[1], М.Г. Рубанович[1]

[1] Новосибирский государственный технический университет

МОДУЛЬНЫЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

Одним из перспективных направлений в области построения модульных многоэлементных аттенюаторов или нагрузок для современной передающей аппаратуры цифрового телевещания является использование планарных резисторов с диэлектрической подложкой из бериллиевой керамики. В настоящей статье предложен принцип построения и расчета модульных сверхвысокочастотных (СВЧ) аттенюаторов и нагрузок на большие уровни мощности рассеивания с параллельным и последовательным соединением пленочных планарных резистивных элементов. Данный метод позволяет разрабатывать устройства с входной мощностью СВЧ-сигнала до 10 кВт и полосой рабочих частот 0–1 ГГц на основе унифицированных модулей. Рассмотрен конкретный вариант построения модульного СВЧ-аттенюатора на уровень мощности 5 кВт, выполненного на основе микрополосковой пленочной технологии с использованием диэлектрической подложки из бериллиевой керамики.

Ключевые слова: *делитель мощности, пленочный резистор, планарный резистор*

Введение

В современной передающей аппаратуре цифрового телевещания существует необходимость измерения энергетических и информационных параметров выходных сигналов. Основными особенностями при этом являются большой динамический диапазон измеряемых мощностей и широкая полоса рабочих частот. Так, по уровню выходной мощности блоки и узлы радиопередающей аппаратуры различаются на несколько порядков – от десятков милливатт до тысяч ватт. В то же время допустимый диапазон входных мощностей существующей измерительной аппаратуры ограничивается несколькими милливаттами. Это приводит к необходимости использовать мощные аттенюаторы с фиксированными значениями вносимого ослабления либо применять встроенные в передающую аппаратуру устройства для ответвления части мощности выходного сигнала [1–4].

В общем случае широкополосные нагрузочные устройства дециметрового диапазона могут быть реализованы на основе коаксиальной или полосковой элементной базы. Сопоставление технических параметров поглощающих элементов различного типа показало, что планарные пленочные резисторы обладают технологическими и конструктивными преимуществами по сравнению с другими видами поглощающих элементов [5].

Многоэлементные аттенюаторы большой мощности, построенные в виде модульной структуры с использованием пленочных резисторов, имеют ряд существенных преимуществ, среди которых высокая ремонтопригодность, малые габаритные размеры и масса, конструктивная и технологическая простота. Использование в аттенюаторе идентичных модулей упрощает его изготовление и эксплуатацию. В таких аттенюаторах для рассеяния тепла обычно применяется воздушное охлаждение, которое технологически и конструктивно значительно проще жидкостного.

Таким образом, в настоящее время наиболее перспективным направлением в создании мощных аттенюаторов является использование унифицированных модульных структур с диссипативными элементами в виде планарных пленочных резисторов. Пленочные резисторы изготавливаются по современным методам микрополосковой технологии на подложке из материала с высокой теплопроводностью и низким значением относительной диэлектрической проницаемости [6, 7].

Анализ характеристик существующих на сегодня СВЧ-диэлектриков позволяет сделать вывод о целесообразности применения подложек из оксида бериллия (BeO), обладающего высокой теплопроводностью, что обеспечивает значительные уровни рассеиваемой мощности. Малое значение относительной диэлектрической проницаемости оксида бериллия позволяет, особенно в области высоких частот, минимизировать влияние паразитной емкости планарных пленочных резисторов на качество согласования [8].

Учитывая вышеизложенное, одним из перспективных направлений в области построения

модульных многоэлементных аттенюаторов или нагрузок является использование планарных резисторов с диэлектрической подложкой из бериллиевой керамики. Полоса рабочих частот таких устройств находится в пределах от 0 до 1 ГГц при уровне входной мощности до нескольких кВт.

Модульный аттенюатор

Основой модульного СВЧ-аттенюатора (нагрузки) на планарных резисторах большой мощности является использование параллельно-последовательного соединения диссипативных модулей значительно меньшей мощности, чем общая мощность входного СВЧ-сигнала. Объединение большого числа универсальных модулей, расположенных на значительном расстоянии друг от друга, обеспечивает распределение рассеиваемой тепловой мощности в аттенюаторе на большую площадь. Это дает возможность отказаться от жидкостного охлаждения и перейти на воздушное конвективное охлаждение.

Рассмотрим принцип модульного построения на примере аттенюатора с уровнем рассеиваемой мощности 5 кВт. Аттенюатор имеет входное и выходное сопротивление 50 Ом, полоса рабочих частот составляет 0–1 ГГц. Структурная схема такого модульного аттенюатора приведена на рис. 1.

В конструкции прибора используется входной модуль в виде резистивного блока 12,5 Ом, двухканальный делитель мощности и два универсальных модуля на уровень мощности 2000 Вт, представляющие собой аттенюаторы с входным сопротивлением 75 Ом.

В данном модульном аттенюаторе к делителю мощности с входным сопротивлением 37,5 Ом подключен входной модуль с сопротивлением 12,5 Ом (рис. 1). Поскольку 12,5 Ом равняется четвертой части от 50 Ом, на резистивном блоке рассеивается четвертая часть всей входной мощности, то есть 1250 Вт.

Входной модуль

На каждом пленочном резисторе, выполненном на бериллиевой керамике размером 20×20×4 мм, допустимая рассеиваемая мощность не превышает 200 Вт. Поэтому входной модуль на 1250 Вт реализован из шести последовательно соединенных через короткие отрезки линии передачи одинаковых резисторов, имеющих сопротивление 2,0 Ом, как показано на рис. 2.

Для расчета отрезков линии передачи, соединяющих планарные пленочные резисторы, составим в сосредоточенном элементном базисе эквивалентную схему входного модуля (рис. 3). Заменим

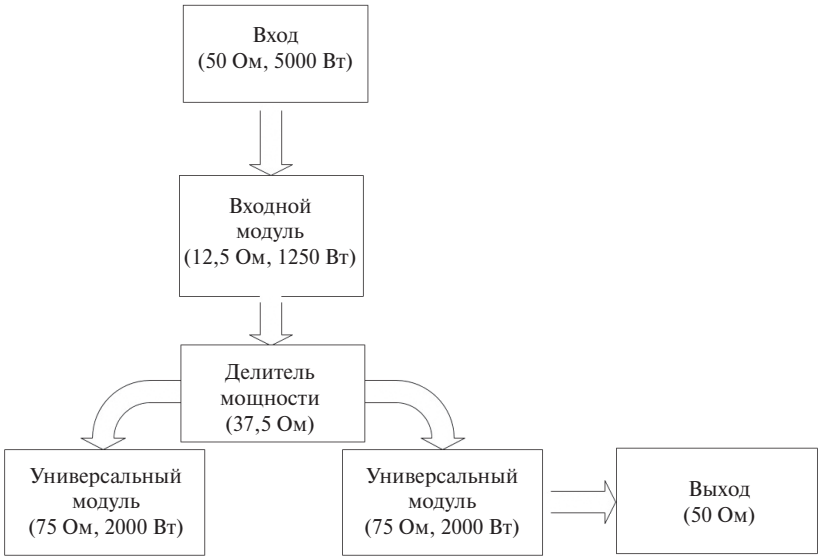


Рисунок 1. Структурная схема модульного аттенюатора на 5 кВт

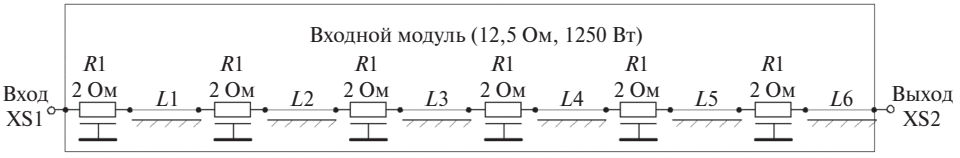


Рисунок 2. Схема входного модуля на 1250 Вт

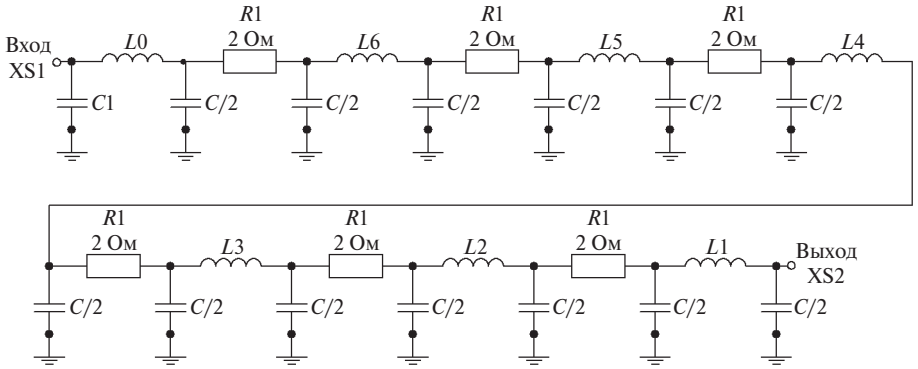


Рисунок 3. Эквивалентная схема входного модуля на 1250 Вт

пленочный резистор сопротивлением R_1 и двумя емкостями $C/2$, а отрезок линии передачи – индуктивностью L_i. В данном случае на эквивалентной схеме (рис. 3) емкость C является паразитной емкостью планарного пленочного резистора. Поскольку планарный пленочный резистор большой мощности имеет большую ширину и малую длину, его собственной паразитной индуктивностью можно пренебречь. Индуктивности, показанные на рис. 3, являются согласующими элементами. Они образуют вместе с паразитными емкостями фильтр нижних частот (ФНЧ), который в данном случае и является оптимальной согласующей цепью [9].

Отметим, что характеристическое сопротивление согласующих ФНЧ увеличивается на величину R_1 = 2 Ом, начиная от 37,5 Ом. Характеристическое сопротивление последнего согласующего ФНЧ, являющегося входом модульного аттенюатора, составляет 50 Ом.

Для определения паразитной емкости C рассмотрим более подробно конструкцию планарного пленочного резистора, показанную на рис. 4.

Емкость между резистивной пленкой и металлизированным основанием, разделенными диэлектрической подложкой, представим в виде суммы двух емкостей:

$$C = C_0 + C_k, \quad (1)$$

где C_0 – емкость плоского конденсатора, образованного резистивной пленкой и металлической поверхностью в пределах проекции пленки на нее,

$$C_0 = \frac{\varepsilon_o \varepsilon a b}{l}. \quad (2)$$

Краевая емкость C_k представляет собой емкость между пленкой и металлической поверхностью, вне проекции пленки на нее [6, 9]:

$$C_k = (\varepsilon_o \varepsilon_r \frac{l}{2})\left[120\pi Z_в(b,l,1)/{Z_в}^2(b,l,\varepsilon_r) - \varepsilon_r \frac{b}{l}\right], \quad (3)$$

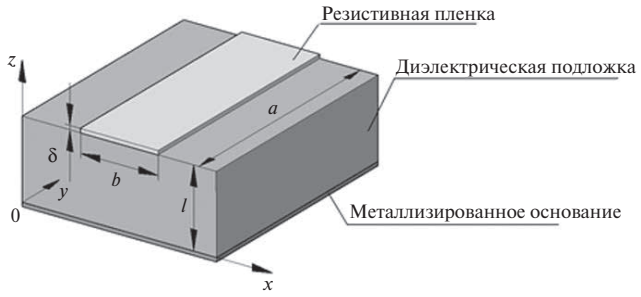


Рисунок 4. Планарный пленочный резистор на диэлектрической подложке: *a* – длина резистивной пленки; *b* – ширина резистивной пленки; δ – толщина резистивной пленки; *l* – расстояние от резистивной пленки до металлизированного основания

где $Z_в$ – волновое сопротивление планарного пленочного резистора при соответствующих размерах резистивной пленки [4, 9]. Наибольшая часть краевой емкости соответствует краю блока резистивной пленки, и при отступлении от края пленки на расстояние, равное толщине диэлектрика, значение краевой емкости практически стремится к нулю.

Расчетные соотношения для граничной частоты f_{ci} и индуктивности L_i ФНЧ третьего порядка с диссипативными потерями при известной величине емкости C, равной паразитной емкости пленочных резисторов, имеют следующий вид [9]:

$$f_{ci} = \frac{g_1}{\pi C(0{,}5R_M + R_1(i-1))}, \quad (4)$$

$$L_i = \frac{g_2(0{,}5R_M + R_1(i-1))}{2\pi f_{ci}}, \quad (5)$$

где $g_1 = \dfrac{1}{\mathrm{sh}^2\left[\dfrac{\ln\left(\mathrm{cth}\dfrac{L_{Ar}}{17{,}37}\right)}{6}\right]}$, $g_2 = \dfrac{1}{\mathrm{sh}^2\left[\dfrac{\ln \mathrm{cth}\left(\dfrac{L_{Ar}}{17{,}37}\right)}{6}\right]+0{,}75}$ –

первый и второй элементы нормированного прототипа чебышевского ФНЧ третьего порядка; L_{Ar} – пульсации амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания (дБ), R_M – входное сопротивление универсального модуля, равное 75 Ом, i – текущий индекс, изменяющийся от 1 до N (количество пленочных резисторов во входном модуле).

Подставим значение граничной частоты (4) и емкости резистивной пленки (1) в формулу (5) и получим универсальную формулу для расчета индуктивности L_i:

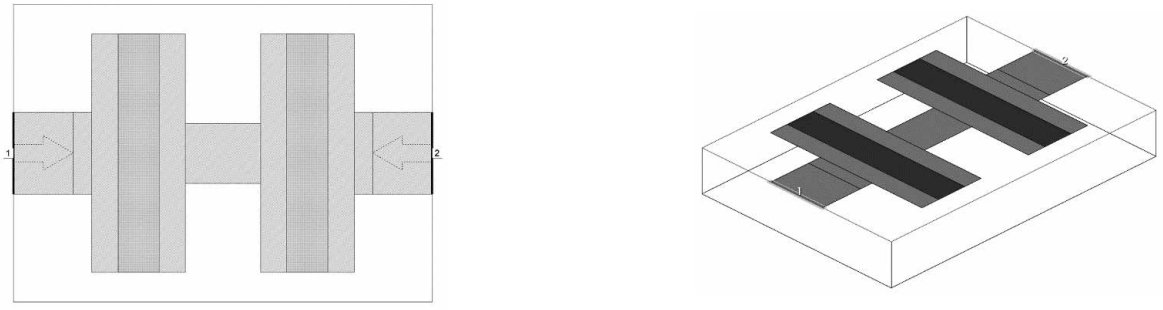
$$L_i = \frac{0{,}5 g_2 (C_0 + C_k)(0{,}5 R_M + R_1 (i-1))^2}{g_1}, \qquad (6)$$

где C_0 и C_k – паразитные емкости пленочного резистора.

Эквивалентная схема входного модуля (рис. 3) и значения параметров ее элементов являются первоначальным приближением для разработки микрополосковой топологии и последующего проведения численного электродинамического моделирования в компьютерной САПР.

Для планарных пленочных резисторов (2 Ом), показанных на эквивалентной схеме (рис. 3), была разработана микрополосковая топология, ориентированная на использование диэлектрической подложки из BeO размером 20×20×4 мм. Для улучшения согласования в области высоких частот все планарные пленочные резисторы (2 Ом) выполнены в виде двух последовательно включенных резисторов прямоугольной формы размером 16×3 мм, как показано на рис. 5.

В соответствии с эквивалентной схемой (рис. 2) в компьютерной САПР было проведено моделирование частотных свойств входного модуля на мощность 1250 Вт, состоящего из пленочных резисторов, соединенных короткими отрезками микрополосковых линий. Длина последних определяется значениями индуктивностей, рассчитанных по формуле (6). В начале расчета проводилось численное электромагнитное моделирование каждого резистора в соответствии с топологией (рис. 5), а затем определялись частотные характеристики входного блока по схеме на рис. 6.



а) б)

Рисунок 5. Модель пленочного резистора сопротивлением 2 Ом: а – топология; б – 3D-модель

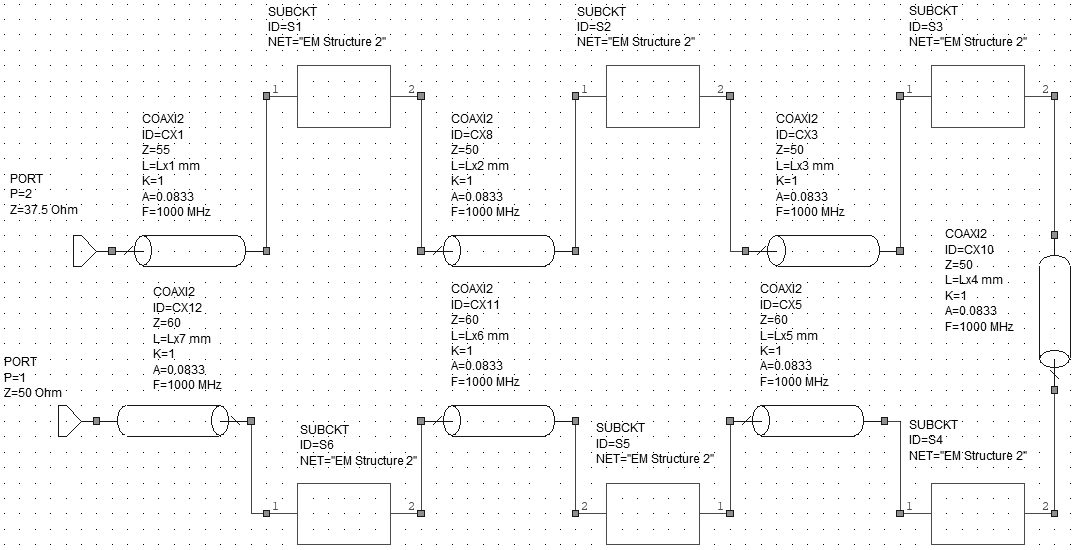


Рисунок 6. Схема для моделирования входного модуля на 1250 Вт

Результаты компьютерного моделирования частотной зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) для входного модуля (12,5 Ом) приведены на рис. 7.

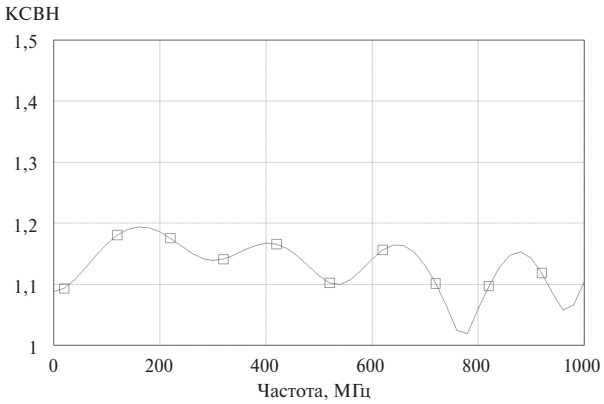


Рисунок 7. Частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению входного модуля на мощность 1250 Вт

Двухканальный делитель мощности

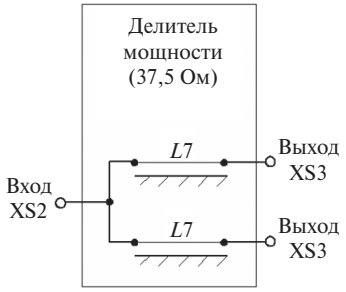
Основной задачей при разработке двухканального делителя мощности было обеспечение приемлемого коэффициента стоячей волны по входу в заданной полосе частот 0–1000 МГц. Так как структура рассматриваемого модульного аттенюатора симметрична, был выбран двухканальный делитель мощности на основе Y-образного тройника, топология которого показана на рис. 8. Расчеты и экспериментальные измерения показали, что КСВН по входу двухканального делителя мощности не превышает 1,2 в полосе частот 0–1500 МГц.

Универсальный модуль

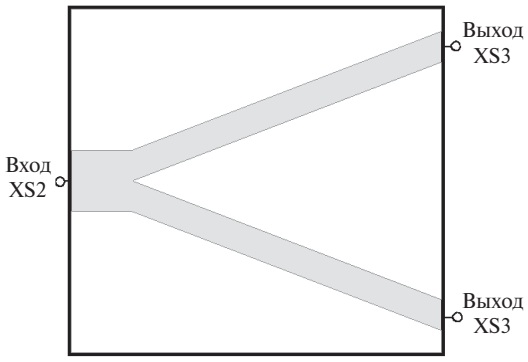
Универсальный модуль, представляющий собой аттенюатор на мощность рассеивания 2000 Вт с входным сопротивлением 75 Ом, реализован по аналогичной структуре, как и рассматриваемый аттенюатор на 5 кВт. Электрические схемы основных модулей аттенюатора на 2000 Вт показаны на рис. 9. Общая мощность 2000 Вт равномерно распределена на три внутренних модуля. Таким образом, в конструкции аттенюатора на 5 кВт модульный принцип использован дважды.

Из принципиальной схемы (рис. 9) видно, что аттенюатор на 2000 Вт выполнен в виде последовательно-параллельного соединения резистивных элементов.

Как показали экспериментальные измерения частотных характеристик опытного образца универсального модуля на уровень мощности 2000 Вт с входным сопротивлением 75 Ом, показанного на рис. 10, значение КСВН в полосе рабочих частот 0–1000 МГц не превышает 1,2. Аттенюатор на 2000 Вт имеет два выхода с вносимым ослаблением 23 и 46 дБ.



а)



б)

Рисунок 8. Двухканальный делитель мощности: а – схема; б – топология

Заключение

Предложенный принцип построения многоэлементных аттенюаторов и нагрузок большой мощности на основе типовых универсальных модулей с параллельным и последовательным соединением пленочных планарных резистивных элементов позволяет разрабатывать согласованные диссипативные устройства с входной мощностью СВЧ-сигнала до 10 кВт и полосой рабочих частот 0–1 ГГц.

Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование основных модулей показало, что разработанный аттенюатор с входной мощностью 5000 Вт имеет коэффициент стоячей волны не более 1,2 в полосе частот от 0 до 1000 МГц, что отвечает общим требованиям для передающей аппаратуры цифрового телевидения.

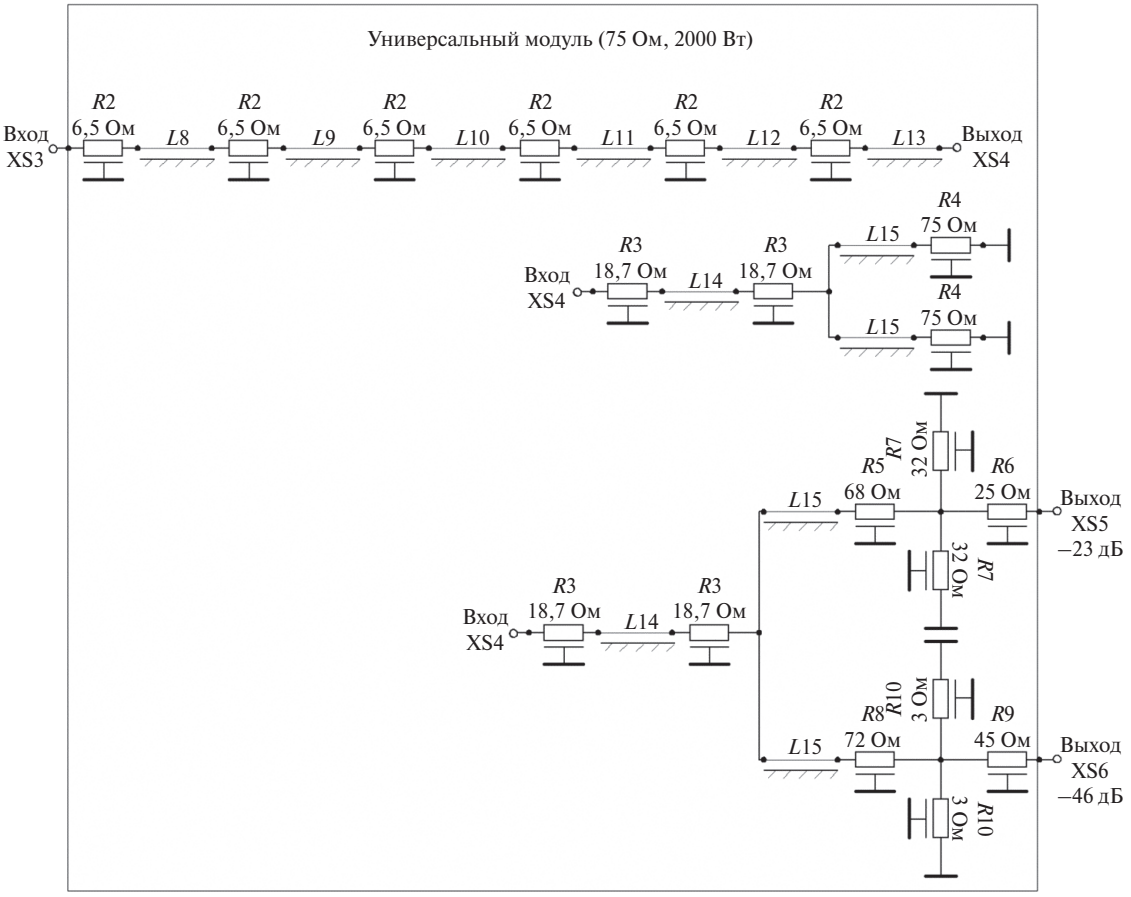
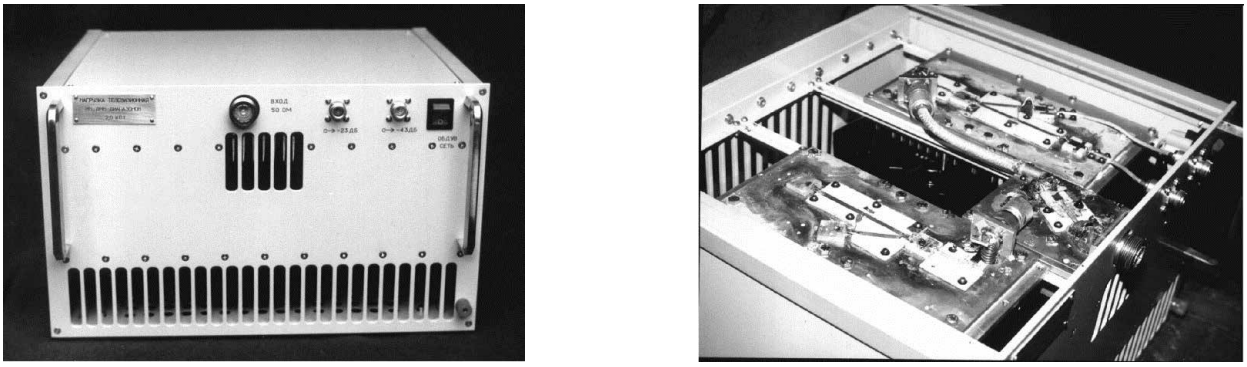


Рисунок 9. Схема универсального модуля на 2000 Вт



а) б)

Рисунок 10. Опытный образец универсального модуля на 2000 Вт: а – внешний вид; б – внутренняя конструкция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akishin G.P., Turnaev S.K., et al. Composition of beryllium oxide ceramics // Refractories and Industrial Ceramics. 2011. Vol. 51. No. 5. P. 377–381.
2. Tang C.-W. A Design of 3-dB wideband microstrip power divider with an ultra-wide isolated frequency band // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2016. Vol. 64. No. 6. P. 1806–1811.
3. Cano J.L. Ultra-wideband chip attenuator for precise noise measurements at cryogenic temperatures // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2010. Vol. 58. No. 9. P. 2504–2509.
4. Столяренко А.А. и др. Мощные СВЧ аттенюаторы для радиопередающей и телевизионной аппаратуры // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: матер. 6-й Общерос. науч.-техн. конф. Омск: ОмГТУ, 2016. С. 337–344.
5. Савенков Г.Г., Разинкин В.П., Мехтиев А.Д. Многоступенчатая микрополосковая СВЧ нагрузка // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 4. С. 53–57.

6. Митьков А. С., Столяренко А. А., Рубанович М. Г. Пленочные сверхвысокочастотные аттенюаторы на основе фильтровых структур с диссипативными потерями // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 84–89.
7. Митьков А. С., Столяренко А. А., Азарный А. А. Новые структуры резистивных аттенюаторов в тонкопленочном исполнении. Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018). Новосибирск, 2018. Т. 4. С. 147–150.
8. Bird RF Technologies [Электронный ресурс] URL: http://www.birdrf.com/Products/Test%20and%20Measurement/Attenuators/1kW.aspx (дата обращения: 03.09.2019).
9. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Москва: Связь, 1971. Т. 1. 439 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Митьков Александр Сергеевич, аспирант, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20, тел.: 8 (923) 256-25-77, e-mail: am@alfa-instr.ru.
Рубанович Михаил Григорьевич, д. т. н., профессор, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20, тел.: 8 (903) 998-03-89, e-mail: mihail-nstu@mail.ru.

For citation: Mitkov A. S., Rubanovich M. G. High power modular microwave attenuators. Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 31–37.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-31-37

A. S. Mitkov, M. G. Rubanovich

HIGH POWER MODULAR MICROWAVE ATTENUATORS

One of the promising areas in the design of modular multi-element attenuators or loads for modern digital television broadcasting equipment is the use of planar resistors with a dielectric substrate made of beryllium ceramic. The article proposes the principle of constructing and calculating modular microwave attenuators and loads on large levels of dissipation power with parallel and serial connection of planar film resistive elements. This method allows to develop devices based on unified modules with an input microwave power up to 10 kW and a working frequency band of 0–1 GHz. In this article the specific embodiment of the construction of a modular microwave attenuator at a power level of 5 kW, made on the basis of microstrip film technology using a beryllium ceramic dielectric is considered.

Keywords: power divider, film resistor, planar resistor

REFERENCES

1. Akishin G. P., Turnaev S. K., et al. Composition of beryllium oxide ceramics. *Refractories and Industrial Ceramics,* 2011, vol. 51, no. 5, pp. 377–381.
2. Tang C.-W. A Design of 3-dB wideband microstrip power divider with an ultra-wide isolated frequency band. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.,* 2016, vol. 64, no. 6, pp. 1806–1811.
3. Cano J. L. Ultra-wideband chip attenuator for precise noise measurements at cryogenic temperatures. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.,* 2010, vol. 58, no. 9, pp. 2504–2509.
4. Stolyarenko A. A., et al. Powerful microwave attenuators for radio and television equipment. (Conference proceedings) Obmen opytom v oblasti sozdaniya sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh system. Omsk, OmSTU Publ., 2016, pp. 337–344. (In Russian).
5. Savenkov G. G., Razinkin V. P., Mekhtiev A. D. Multistage microstrip UHF load. *Voprosy radioelektroniki,* 2018, no. 4, pp. 53–57. (In Russian).
6. Mitkov A. S., Stolyarenko A. A., Rubanovich M. G. Film attenuators based on filter structures with dissipative losses. *Voprosy radioelektroniki,* 2019, no. 4, pp. 84–89. (In Russian).
7. Mitkov A. S., Stolyarenko A. A., Azarnyi A. A. The new structures of thin-film attenuators. (Conference proceedings) Aktualnye problemy elektronnogo priborostroeniya, Novosibirsk, 2018. Vol. 4, pp. 147–150. (In Russian).
8. Bird RF Technologies. Available at: http://www.birdrf.com/Products/Test%20and%20Measurement/Attenuators/1kW.aspx (accessed 03.09.2019).
9. Matthaei G., Young L., Jones E. M. T. *Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures.* Artech House, 1980, 1096 p.

AUTHORS

Mitkov Alexander, graduate student, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (923) 256-25-77, e-mail: am@alfa-instr.ru.
Rubanovich Mikhail, D. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (903) 998-03-89, e -mail: mihail-nstu@mail.ru.

Для цитирования: Горбачев А.П., Паршин Ю.Н. Печатная четырехлучевая фазированная антенная решетка с модифицированными дифференциальными фазовращателями // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 38–45.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-38-45
УДК 621.396.677

А.П. Горбачев[1], Ю.Н. Паршин[1]

[1] Новосибирский государственный технический университет

ПЕЧАТНАЯ ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВАЯ ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ ФАЗОВРАЩАТЕЛЯМИ

В работе представлены результаты проектирования четырехлучевой фазированной антенной решетки с применением диаграммообразующей матрицы Батлера. Сама матрица выполнена на основе трехдецибельных направленных ответвителей и модифицированных фазовращателей. Новизна предлагаемой разработки обусловлена большей широкополосностью запатентованных полосковых фазовращателей, которая, в свою очередь, определяется более стабильным в диапазоне частот характером электромагнитного взаимодействия двух проводников, связанных с каждой половиной печатного кольцевого резонатора. Использование в ответвителях и фазовращателях симметричных полосковых линий с волной Т-типа снимает ограничения, связанные с влиянием дисперсии на уравновешенность электрической и магнитной связей в областях электромагнитного взаимодействия двух параллельных связанных передающих линий. Выбранные в качестве элементной базы проектируемой матрицы Батлера трехдецибельный направленный ответвитель и модифицированный фазовращатель обеспечили приемлемую полосу пропускания при центральной частоте 2,2 ГГц. Исходя из системного подхода к проектированию антенных решеток, выбраны следующие ключевые этапы разработки: трехдецибельный направленный ответвитель, модифицированный фазовращатель, печатный дипольный излучатель, матрица Батлера 4х4, четырехлучевая фазированная антенная решетка. Для создания топологий на отечественном материале ФАФ-4Д использовалась среда NanoCAD5.1, а для моделирования – среда WIPL-D.

Ключевые слова: *матрица Батлера, диаграммообразующее устройство, направленный ответвитель*

Введение

Многолучевые фазированные антенные решетки (ФАР) широко применяются в радиотехнических и инфокоммуникационных системах различного назначения [1, 2]. При их проектировании, а также в процессе доработок и модернизации уже существующих антенн приходится решать взаимосвязанные конструктивно-технологические вопросы компоновки и реализации печатных направленных ответвителей, дифференциальных фазовращателей и пересечений печатных полосковых линий в двух уровнях [3].

В настоящей работе исследуется модернизированная 4-лучевая решетка, в конструкции которой требуется реализовать наряду с ответвителями и пересечениями модифицированные дифференциальные фазовращатели с улучшенными показателями по широкополосности [4]. Поэтому ниже на основе системного подхода описываются ключевые этапы построения такой решетки в печатном исполнении на отечественном диэлектрике ФАФ-4Д. При этом проектируемая ФАР позволяет реализовать с одной конструктивно-компоновочной единицы четыре разнонаправленных в окружающем пространстве диаграммы направленности. Их направление зависит от номера входа диаграммообразующей матрицы Батлера, а ширина в плоскости электрического вектора E примерно одинакова. Такие ФАР востребованы при построении инфокоммуникационных систем с повышенной степенью защищенности от электромагнитных излучений с нежелательных направлений [5–9].

Цель работы – в рамках эскизного проектирования доказать возможность улучшения показателей широкополосности 4-лучевой антенной решетки за счет использования модифицированных в [4] дифференциальных фазовращателей при сохранении формы и уровня боковых лепестков всех четырех диаграмм направленности в плоскости электрического вектора E.

Системный анализ ключевых этапов проектирования

Описанный в [1] системный подход в компоновке и конструировании многолучевых антенн рекомендует придерживаться ряда ключевых этапов при проектировании. Эти этапы описаны в [3], и в ходе их выполнения предстоит заново реализовать следующие устройства:

- трехдецибельный направленный ответвитель (мостовой восьмиполюсник);
- модифицированный дифференциальный фазовращатель;
- матрица Батлера [10] с четырьмя входами и выходами.

При этом из соображений унификации печатный дипольный излучатель остается неизменным по структуре (то есть аналогичен работе [3]), и лишь некоторые его установочные и присоединительные геометрические размеры слегка изменены для качественной состыковки с выходами вновь реализованной матрицы Батлера.

Направленный ответвитель

Направленный ответвитель (НО) является ключевым элементом диаграммообразующего устройства, так как он отвечает за деление поровну (в отношении 1:1) сигнала между его выходами. В результате расчетов по материалам справочника [11] и проектирования была получена симметричная конструкция НО со смещением связанных полосковых линий, которая представлена на рис. 1.

Результаты проектирования для затухания и фазовой задержки между выходами представлены на рис. 2. Компьютерное моделирование показало, что этот НО обеспечивает в полосе частот 2–2,4 ГГц затухания –3,15 ± 0,02 дБ и набег фазы на третьем порту относительно второго 90 ± 0,5°, что является приемлемым результатом.

Модифицированный фазовращатель

Для того чтобы устройство работало в полосе частот, а не только на определенной частоте, было принято решение использовать модифицированный фазовращатель.

Модифицированный полосковый фазовращатель [4] представляет собой два отрезка связанных линий, смежные концы которых соединены, а два других конца являются соответственно входом и выходом фазовращателя. Главное отличие предложенного фазовращателя состоит в том, что с целью уменьшения искажений временных интервалов в импульсном режиме за счет увеличения его широкополосности дополнительно введен кольцевой проводник, электромагнитно связанный по всему периметру с отрезками связанных линий (рис. 3).

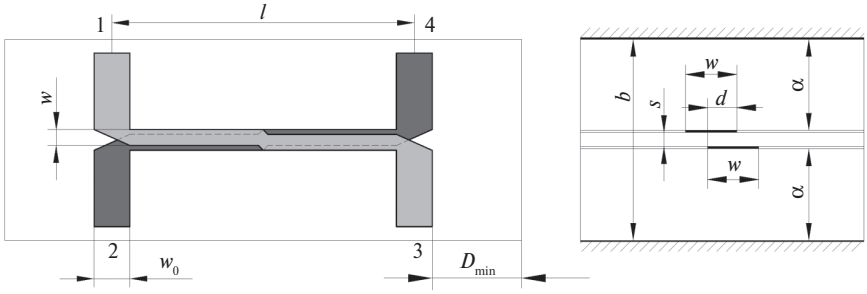


Рисунок 1. Четвертьволновый трехдецибельный направленный ответвитель. Светло-серым цветом обозначена металлизация лицевой стороны пленки, темно-серым – металлизация обратной стороны пленки, белым – фольгированная с двух сторон пленка из материала ФАФ-4Д толщиной 0,3 мм

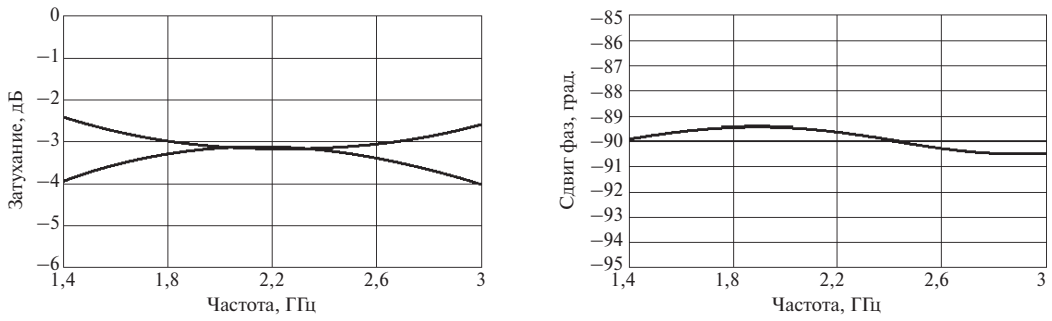


Рисунок 2. Графики неравномерности затухания и фазовой задержки

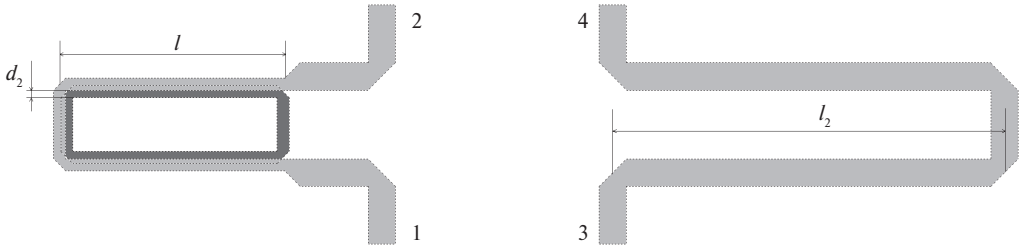


Рисунок 3. Модифицированный фазовращатель: линия 1–2 – модифицированный фазовращатель; линия 3–4 – компенсационная линия для обеспечения дифференциального фазового сдвига

Результаты электродинамического моделирования (затухания в обеих линиях и фазовый сдвиг в линии *3–4* относительно *1–2*) изображены на рис. 4. Согласно полученным результатам, фазовращатель в полосе частот 1,4–3 ГГц имеет вполне приемлемые параметры: затухание –0,1 ± 0,1 дБ; разность фаз 45 ± 1°.

Печатный дипольный излучатель

В качестве излучателя использовалась топология из работы [3], доработанная в связи с другими стандартными толщинами диэлектрического материала (рис. 5). Буквой А на схеме обозначена точка пайки центрального штырька коаксиально-полоскового разъема типа Э2–116/2, а металлизация обратной стороны подложки под точкой А гальванически соединена с металлическим корпусом несущей конструкции по всей поверхности прилегания. Топология обеспечивает вполне приемлемое согласование с подводящей линией волнового сопротивления 50 Ом (рис. 6).

Матрица Батлера 4×4

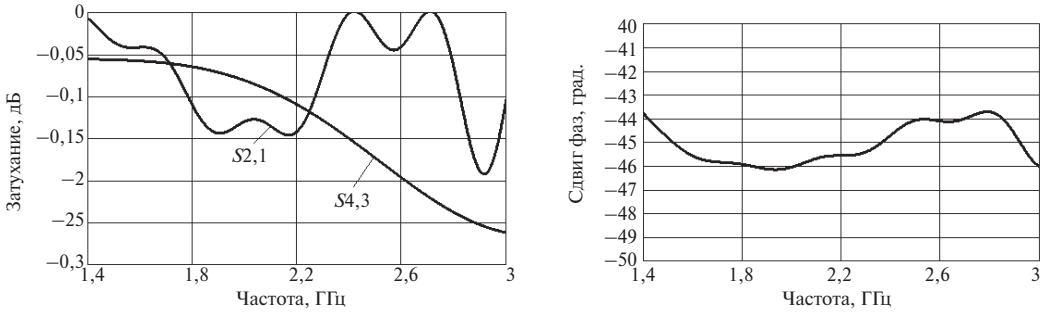


Рисунок 4. Графики затухания и фазового сдвига

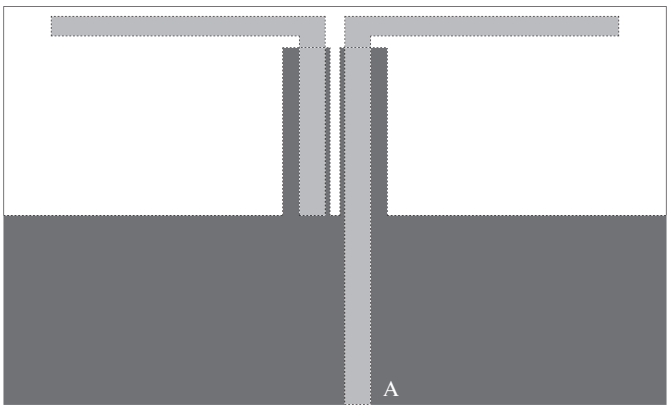


Рисунок 5. Дипольный излучатель на 2,2 ГГц. Светло-серым цветом обозначена металлизация лицевой стороны диэлектрика, темно-серым – металлизация обратной стороны диэлектрика, белым – сам диэлектрик из материала ФАФ-4Д толщиной 1,5 мм

В проектировании [11, 12] диаграммообразующего устройства (рис. 7) по аналогии с работой [3] использовались упомянутые выше элементы – направленный ответвитель и модифицированный фазовращатель. Для электрического контакта между слоями диэлектрической пленки использовались сквозные металлизированные отверстия размером 0,3×2,6 мм.

После анализа данной топологии посредством трехмерного полноволнового моделирования [13] получили результаты, представленные на рис. 8. Величины затухания составили –6,2 ± 0,6 дБ, а максимальное отклонение от номинальных разностей фаз не превысило 8°. При этом поперечные геометрические размеры полосковых линий составили 2,6×0,035 мм, что удовлетворяет конструкторско-технологическим ограничениям при печатной реализации проводников на тонком (0,3 мм) двухстороннем фольгированном диэлектрике [14, 15].

Четырехлучевая фазированная антенная решетка

Заключительным этапом являлось сочленение матрицы Батлера 4×4 и антенного полотна, состоящего из четырех дипольных излучателей. Для этого необходимо было доработать участок соединения, добавив еще один узел пересечения линий с противоположных сторон пленки. Кроме того, выходные

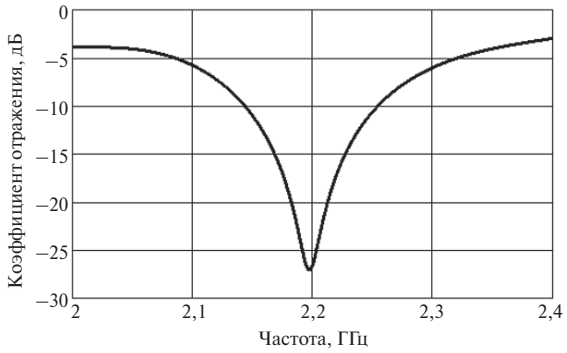


Рисунок 6. Частотная характеристика согласования дипольного излучателя

выводы были размещены на расстоянии 68 мм друг от друга. Топология разведенной платы представлена на рис. 9.

После трехмерного полноволнового электродинамического моделирования топологии в системе автоматизированного проектирования WIPL-D оказалось, что антенная решетка обеспечивает достаточно хорошее согласование с 50-омными коаксиальными кабелями, что подтверждается характеристикой, представленной на рис. 10. Также получились вполне приемлемые диаграммы направленности в плоскостях векторов электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей, которые представлены на рис. 11. Они свидетельствуют

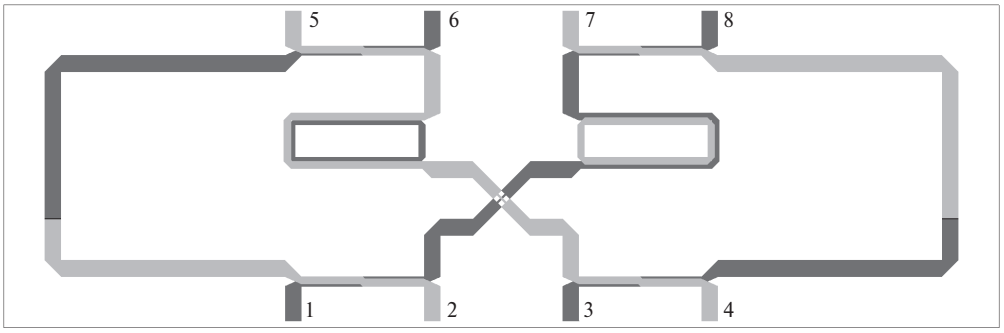


Рисунок 7. Топология матрицы Батлера 4×4: 1–4 – входы; 5–8 – выходы

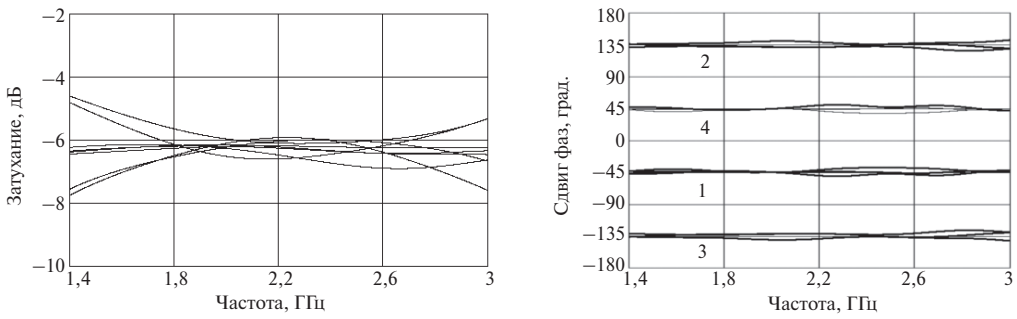


Рисунок 8. Графики затухания и фазового сдвига в каналах матрицы Батлера

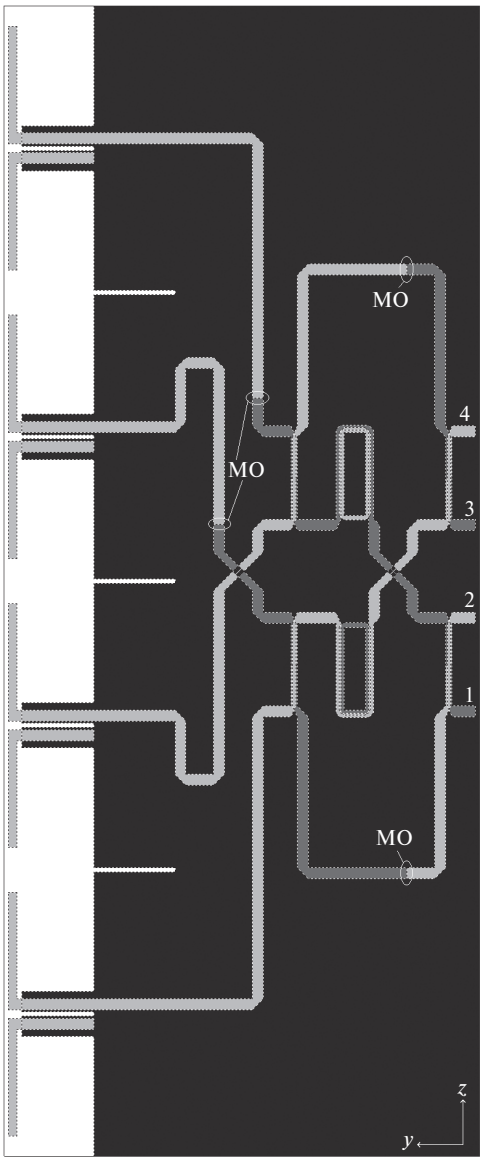


Рисунок 9. Топология четырехлучевой фазированной антенной решетки

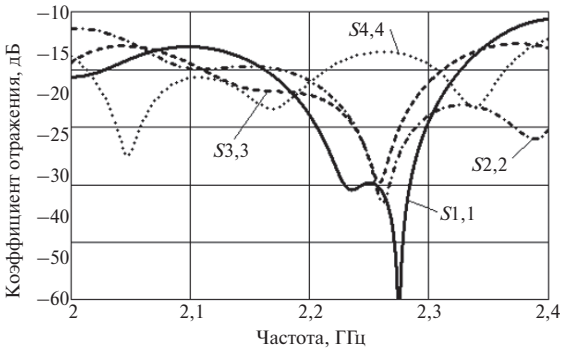


Рисунок 10. Частотная характеристика согласования входов четырехлучевой фазированной антенной решетки

о соответствии углов отклонения максимумов диаграмм направленности в плоскости вектора E спроектированной на ФАФ-4Д антенны тем значениям, которые обусловлены классической теорией диаграммообразования в многолучевых ФАР [1, 9]. Среднее значение коэффициента усиления составило 6,8 дБ, что также соответствует теории линейных эквидистантных ФАР с числом элементов, равным 4 [1, 2]. Поскольку в спроектированной антенне амплитудное распределение возбуждения вдоль дипольных излучателей равномерное, то, согласно [1, 2], уровень боковых лепестков в плоскости вектора E убывает по мере роста их номера (главный лепесток диаграммы имеет нулевой номер). При этом уровень первого бокового лепестка всех диаграмм направленности не превышает –12 дБ по отношению к их максимуму, что также находится в приемлемом соответствии с теорией, согласно которой при четырех излучателях максимум первого бокового лепестка интерференционного множителя решетки должен быть равен –13,46 дБ [1, 2]. Кроме того, ширина по уровню половинной мощности всех четырех диаграмм направленности в E-плоскости, значения которых определяются согласно теореме перемножения как произведение диаграммы направленности классического диполя и интерференционного множителя эквидистантной решетки из четырех элементов [1, 2], составляет в среднем 34°, что также вполне соответствует классическим положениям теории ФАР.

Согласно этой теории, в антенных решетках из линейно поляризованных в E-плоскости дипольных излучателей диаграммы направленности в плоскости магнитного вектора H для всех четырех лучей должны быть всенаправлены. Однако это справедливо лишь при обособленных излучателях, эквидистантно расположенных в свободном безграничном пространстве. В рассматриваемом же проекте дипольные излучатели ФАР возвышаются над кромкой (по другой терминологии: выступают за границу кромки) заземленной металлизации обратной стороны печатных заготовок толщиной 1,5 мм приблизительно на четверть длины волны, соответствующей центральной частоте 2,2 ГГц (рис. 9). В заземленной металлизации были реализованы три узкие, достаточно протяженные щели, перпендикулярные кромке (рис. 9), для уменьшения влияния излучения вторичных токов проводимости, наведенных на этой кромке первичным электромагнитным излучением диполей. Тем не менее влияние вторичного излучения наведенных как в кромке фольги, так и в узкой кромке соответствующей части несущей конструкции корпуса ФАР токов проводимости заметно сказалось на форме диаграмм направленности спроектированной антенны в «задней» полусфере (рис. 9, $y < 0$). В то же время вторичные токи проводимости не оказали существенного

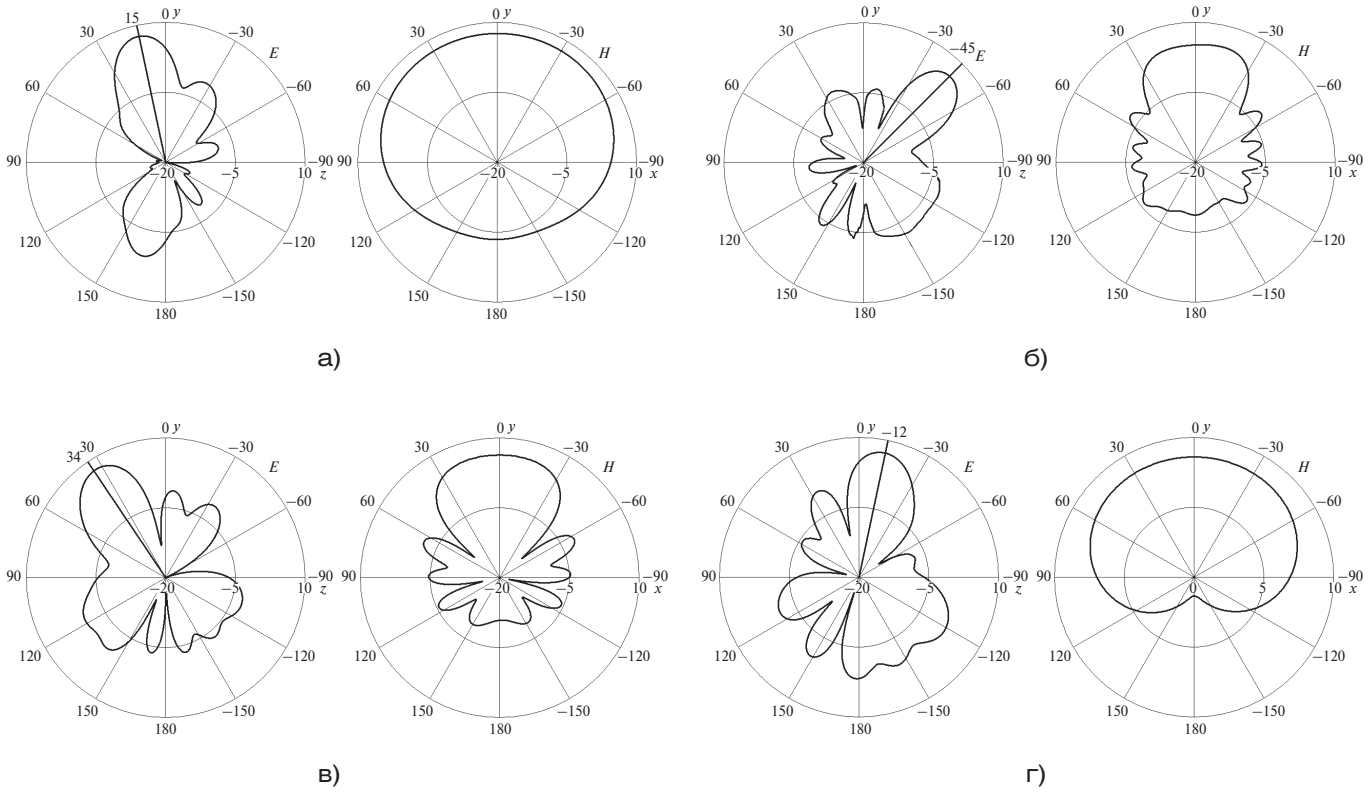


Рисунок 11. Диаграммы направленности фазированной антенной решетки в *E*- и *H*-плоскостях на входах со следующими номерами: а – один; б – два; в – три; г – четыре

влияния на форму диаграмм в «верхней» – рабочей (рис. 9, $y > 0$) полусфере.

Сопоставление полученных результатов с данными других авторов свидетельствует о том, что углы отклонения лучей ФАР, их коэффициенты усиления и уровни боковых лепестков не хуже опубликованных в работах [5–9]. В то же время относительная полоса рабочих частот лучей спроектированной ФАР на 13–16% больше (значение зависит от номера луча), чем у матриц Батлера и антенных решеток, описанных в работах [5–9].

Заключение

Полученные в работе результаты свидетельствуют о достижении положительного эффекта от использования модифицированных дифференциальных фазовращателей в проектировании четырехлучевой ФАР. Наихудшее значение входного коэффициента отражения в рабочей полосе частот 2–2,4 ГГц составило –11 дБ по первому входу. Неравномерность затухания сигналов на входах антенного полотна составила –6,2 ± 0,6 дБ, а расфазировка не превысила 8° от номинальных значений. В итоге можно заключить, что модифицированные печатные фазовращатели вполне результативно применены в конструкции четырехлучевого диаграммообразующего устройства, что позволяет считать перспективным их использование при проектировании ФАР с большим числом лучей (диаграмм направленности).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д.И. Воскресенского. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
2. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design. 4th ed. New Jersey, Wiley & Sons, 2016. 1072 p.
3. Горбачев А.П., Паршин Ю.Н. Печатная дипольная 8-лучевая антенная решетка с диаграммообразующей матрицей Батлера на связанных полосковых линиях // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 65–70.
4. Патент СССР на изобретение № 1334221 / 30.08.1987. Бюл. № 32. Горбачев А.П. Полосковый фазовращатель.
5. Gandini E., Ettorre M., et al. A lumped-element unit cell for beam-forming networks and its application to a miniaturized Butler matrix // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2013. Vol. 61. No. 4. P. 1477–1487.
6. Lin T.-H., Hsu S.-K., Wu T.-L. Bandwidth enhancement of 4×4 Butler matrix using broadband forward-wave directional coupler and phase difference compensation // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2013. Vol. 61. No. 12. P. 4099–4109.

7. Wincza K., Gruszczynski S. Broadband integrated 8x8 Butler matrix utilizing quadrature couplers and Schiffman phase shifters for multibeam antennas with broadside beam // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2016. Vol. 64. No. 8. P. 2596–2604.
8. Chu H.N., and Ma T.-G. An extended 4×4 Butler matrix with enhanced beam controllability and widened spatial coverage // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66. No. 3. P. 1301–1311.
9. Bantavis P.I., Kolitsidas C.I., et al. A cost-effective wideband switched beam antenna system for a small cell base station // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66. No. 12. P. 6851–6861.
10. Butler J.L., Lowe R. Beam-forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas // Electronic Design. 1961. Vol. 9. No. 4. P. 170–173.
11. Справочник по элементам полосковой техники / под ред. А.Л. Фельдштейна. М.: Связь, 1979. 336 с.
12. Бахарев С.И., Вольман В.И. и др. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. М.: Радио и связь, 1982. 328 с.
13. Kolundzija B.M., et al. WIPL-D: Microwave circuit and 3D EM simulation for RF and microwave applications. Norwood, MA, Artech House, 2005. 414 p.
14. Алексеев В.Г., Гриднев В.Н. и др. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация. М.: Высшая школа, 1984. 528 с.
15. Балакирев М.В., Вохмяков Ю.С. и др. Радиопередающие устройства. М.: Радио и связь, 1982. 257 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горбачев Анатолий Петрович, д.т.н., профессор, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д.20, тел.: 8 (913) 761-91-08, e-mail: apgor@ngs.ru.
Паршин Юрий Николаевич, аспирант, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д.20; инженер-электроник, АО «НПО «Научно-исследовательский институт измерительных приборов – Новосибирский завод имени Коминтерна», Российская Федерация, 630015, Новосибирск, ул. Планетная, д.32, тел.: 8 (965) 829-12-41, e-mail: jurparnik@mail.ru.

For citation: Gorbachev A.P., Parshin Yu.N. Printed four-beam phased antenna array with modified differential phase shifters. Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 38–45.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-38-45

A.P. Gorbachev, Yu.N. Parshin

PRINTED FOUR-BEAM PHASED ANTENNA ARRAY WITH MODIFIED DIFFERENTIAL PHASE SHIFTERS

The paper presents the results of designing a four-beam phased antenna array using a Butler matrix. The matrix itself is made on the basis of three-decibel directional couplers and modified phase shifters. The novelty of the proposed development is due to the greater broadband of the patented strip phase shifters, which, in turn, is determined by the more stable in the frequency range nature of the electromagnetic interaction of the two conductors associated with each half of the printed ring resonator. The use of symmetrical strip lines with a T-wave in taps and phase shifters removes the restrictions associated with the effect of dispersion on the balance of electric and magnetic bonds in the areas of electromagnetic interaction of two parallel coupled transmission lines. The basis for the construction of the device was a three-decibel directional coupler and a modified phase shifter, which provide an acceptable bandwidth at a center frequency of 2.2 GHz. Based on a systematic approach to the design of antenna arrays, the following key development stages were selected: a three-decibel directional coupler; a modified phase shifter; a printed dipole radiator; matrix Butler 4×4; 4-beam phased antenna array. As a dielectric, two-sided foil-coated material FAF-4D with a dielectric constant of 2.5 with thicknesses of 0.3 mm and 1.5 mm was selected. NanoCAD5.1 was used to create the topologies, and WIPL-D was used for modeling.

Keywords: Butler matrix, diagram-forming device, directional coupler

REFERENCES

1. Voskresensky D.I., editor. *Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok* [Microwave devices and antennas. Designing phased antenna arrays]. 4th ed. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012, 744 p. (In Russian).
2. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design.* 4th ed. New Jersey, Wiley & Sons, 2016, 1072 p.
3. Gorbachev A.P., Parshin Yu.N. Printed dipole 8-beam antenna array with chart-forming matrix Butler on connected strip lines. *Voprosy radioelektroniki,* 2019, no. 4, pp. 65–70. (In Russian).
4. Patent RUS No. 1334221 / 30.08.1987. Byul. № 32. Gorbachev A.P. *Stripe phase shifter.*
5. Gandini E., Ettorre M., et al. A lumped-element unit cell for beam-forming networks and its application to a miniaturized Butler matrix. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques,* 2013, vol. 61, no. 4, pp. 1477–1487.
6. Lin T.-H., Hsu S.-K., Wu T.-L. Bandwidth enhancement of 4×4 Butler matrix using broadband forward-wave directional coupler and phase difference compensation. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques,* 2013, vol. 61, no. 12, pp. 4099–4109.
7. Wincza K., Gruszczynski S. Broadband integrated 8x8 Butler matrix utilizing quadrature couplers and Schiffman phase shifters for multibeam antennas with broadside beam. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques,* 2016, vol. 64, no. 8, pp. 2596–2604.

8. Chu H. N., and Ma T.-G. An extended 4×4 Butler matrix with enhanced beam controllability and widened spatial coverage. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques,* 2018, vol. 66, no. 3, pp. 1301–1311.
9. Bantavis P. I., Kolitsidas C. I., et al. A cost-effective wideband switched beam antenna system for a small cell base station. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation,* 2018, vol. 66, no. 12, pp. 6851–6861.
10. Butler J. L., Lowe R. Beam-forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas. *Electronic Design,* 1961, vol. 9, no. 4, pp. 170–173.
11. Feldstein A. L., editor. *Spravochnik po elementam poloskovoi tekhniki* [Reference on the elements of strip technology]. Moscow, Svyaz Publ., 1979, 336 p. (In Russian).
12. Bakharev S. I., Volman V. I., et al. *Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroistv* [Handbook for the calculation and design of microwave strip devices]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 328 p. (In Russian).
13. Kolundzija B. M., et al. WIPL-D: *Microwave circuit and 3D EM simulation for RF and microwave applications.* Norwood, MA, Artech House, 2005, 414 p.
14. Alekseev V. G., Gridnev V. N., et al. *Tekhnologiya EVA, oborudovanie i avtomatizatsiya* [Computer technology, equipment and automation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984, 528 p. (In Russian).
15. Balakirev M. V., Vokhmyakov Yu. S., et al. *Radioperedayushchie ustroistva* [Radio transmitting devices]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 257 p. (In Russian).

AUTHORS

Gorbachev Anatoliy, D. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (913) 761-91-08, e-mail: apgor@ngs.ru.
Parshin Yuriy, postgraduate student, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation; engineer, JSC NPO Scientific and Research Institute of Measurement Instrumentation – Novosibirsk Plant named after the Komintern, 32, Planetnaya St., Novosibirsk, 630015, Russian Federation, tel.: +7 (965) 829-12-41, e-mail: jurparnik@mail.ru.

Для цитирования: Петрушевская А. А., Алешкин Н. А. Модель оптимизации процесса управления производством радиоэлектронных изделий // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 46–50.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-46-50
УДК. 658.5

А. А. Петрушевская[1], Н. А. Алешкин[1]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В статье представлена модель оптимизации процесса управления производством радиоэлектронных изделий, которая обеспечивает сокращение доли бракованной продукции благодаря применению интернета вещей и средств межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования. Внедрение технологических инноваций в производство электроники обусловлено необходимостью снижения затрат на предотвращение и устранение брака готовой продукции, а также достижения большей надежности продукции. Устранение дефектов на ранних этапах (при нанесении паяльной пасты и т.д.), которые в дальнейшем могут привести к появлению брака конечной продукции, является менее затратным процессом, чем устранение неисправности конечной сборки. Реализация модели способствует повышению результативности производственного процесса за счет создания комплекса открытой архитектуры с внедрением элементов концепции киберфизических систем в технологическую линию автоматического монтажа печатных плат.

Ключевые слова: *цифровое производство, автоматический монтаж радиоэлектроники, технологические инновации, межмашинное взаимодействие, процессная модель*

Введение

Актуальность совершенствования существующих и создания перспективных средств управления процессами изготовления радиоэлектроники подтверждена включением направления систем автоматизированного и интеллектуального управления в стратегию развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 г., утвержденную распоряжением правительства от 17 января 2020 г. № 20-р. Базовой задачей стратегии является создание конкурентоспособной отрасли на основе развития научно-технического и кадрового потенциала, оптимизации и технического перевооружения производственных мощностей, создания и освоения новых промышленных технологий, а также совершенствования нормативно-правовой базы для удовлетворения потребностей в современной электронной продукции [1].

Действительно, большинство предприятий на рынке активно инвестируют в создание «умного производства». Изменения касаются практически всех аспектов работы: увеличиваются производственные мощности, устанавливается современное оборудование, автоматизируются процессы управления производством и качеством продукции. В целом развитие и интеллектуализация промышленного производства поддерживаются на государственном уровне, поскольку потребность в современной электронике будет только увеличиваться. Актуальность темы исследования подтверждается разработкой серии предварительных национальных стандартов в области «Умного производства» техническим комитетом «Киберфизические системы» совместно со Всероссийским институтом сертификации при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ.

Реализация интернета вещей при осуществлении автоматического монтажа печатных плат

Состав производственного оборудования, как правило, остается соответствующим базовой структуре, и повышение результативности процессов достигается за счет совершенствования технологии и процессов управления автоматическим монтажом печатных плат. Совершенствование и миниатюризация радиоэлектронной компонентной базы предъявляют новые требования к производственному оборудованию, а также к программным комплексам, обеспечивающим оптимальное функционирование производственных процессов. Человеческий фактор, а также отсутствие учета взаимного влияния частей технологической линии являются в условиях решения указанной задачи непрогнозируемыми негативными факторами неопределенности производственного процесса (ПП) ввиду большой вероятности наступления брака. Реализация направления интернета вещей, в том числе прогнозного моделирования, установки

современных датчиков, которые отслеживают производительность линии и идентифицируют этапы, когда требуется вмешательство, способствует оптимизации времени и повышению результативности ПП.

Особую роль в развитии концепции интернета вещей играют интеллектуальные решения и технологические инновации (ТИ) с использованием межмашинного взаимодействия. Новые возможности для обеспечения качества радиоэлектронной продукции открываются как на основе все более полной цифровизации производства, так и при переходе к полному цифровому жизненному циклу продукции.

Базовая структура цифровой линии производства радиоэлектроники представлена следующими этапами [2]:

- загрузка печатных плат;
- трафаретная печать;
- проверка паяльной пасты;
- загрузка и установка компонентов;
- оплавление;
- лазерная маркировка;
- автоматическая оптическая инспекция.

Поэтапное внедрение ТИ в ПП планируется при внедрении базы данных всех возникающих несоответствий во время автоматического монтажа (рис. 1).

Для поэтапного внедрения ТИ в линию автоматического монтажа радиоэлектроники необходима реализация комплекса мероприятий по организации производства путем установки программных средств и баз данных, осуществляющих прогноз состояния ПП и выявляющих возможные отклонения для их дальнейшей корректировки.

Оптимизация ТП изготовления радиоэлектроники в условиях применения интернета вещей и межмашинного взаимодействия

Оптимизация работы системы управления может достигаться за счет введения средств межмашинного интеллектуального взаимодействия (МИВ) компонентов оборудования. Интеллектуальная самообучающаяся система внедряется на следующих этапах:

- после нанесения паяльной пасты (applying solder paste) – SPI SP;
- после установки компонентов (component installation) – SPI CP;
- после печи оплавления и нанесения лазерной маркировки (automatic optical inspection) – AOI;
- рентгеновский контроль монтажа (x-ray inspection of installation) – AXI.

Критериями оценивания качества продукции на этапах до и после проверки паяльной пасты и автоматической оптической инспекции могут быть покрытие площадки паяльной пастой, наполнение объема трафарета, соблюдение формы отверстия и наличие перемычек.

Одним из обязательных условий применения такого метода является одновременный учет и отслеживание дискретной и непрерывной частей. В большинстве задач управления процессами ряд переменных принимает дискретные значения по таким причинам, как нестационарность, предельная стоимость и объемы номенклатуры, применение аналогов [3]. Задачи смешанного целочисленного или дискретного линейного программирования имеют особый класс, моделирующий ситуацию выбора подходящего варианта с помощью логических операций. Одновременная оптимизация

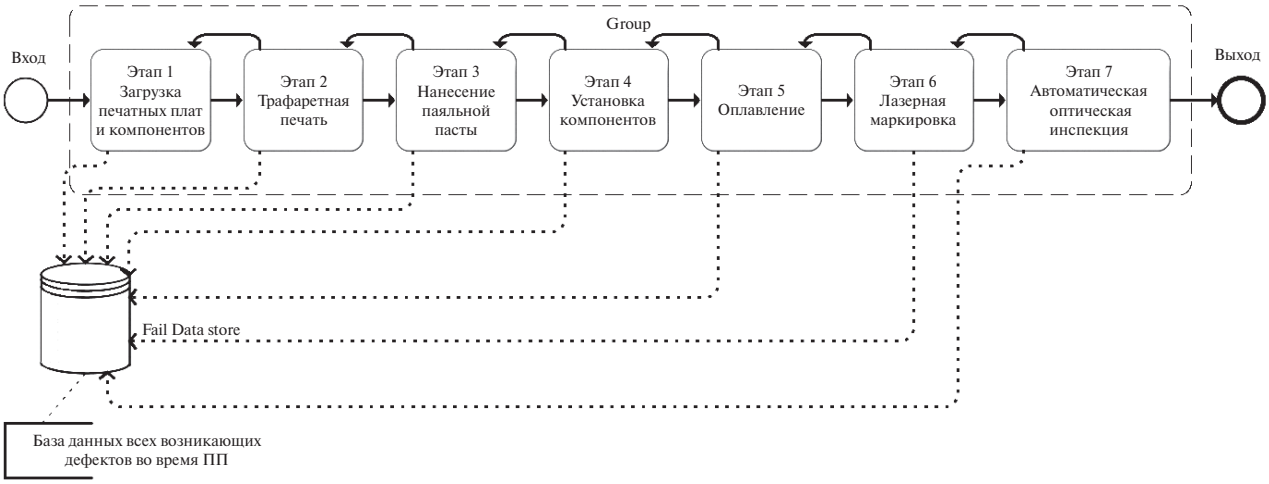


Рисунок 1. Внедрение базы данных возникающих несоответствий при реализации производственного процесса

дискретной и непрерывной частей системы является первостепенной целью при решении задач этого класса. При работе с подобными задачами необходимо выполнить эквивалентные преобразования, что приводит к значительному сокращению степени сложности и упрощению их дальнейшего решения.

Смешанная задача оптимизации при нелинейности системы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} Q(x,y) \Rightarrow \min, \\ J(x,y) \le 0, \\ x \in X, \\ y \in Y,\ y \subset Z, \end{cases} \quad (1)$$

где $Q(x, y)$ – выпуклая функция максимально допустимых ресурсов y для производства изделий x; $J(x, y)$ – выпуклая функция потребления ресурсов y для производства x; X – множественные значения ресурсов; Y – множественные значения изделий.

Для корректного использования функции введены следующие дополнительные условия:

$$\begin{cases} I_{ik-1} + x_{ik} - E_{i-}c_{ik} - \sum_{j<i} J_{ij} x_{jk} = I_{ik}, \\ \sum_{Z_w} \left(G_{ik} y_{ik} + z_{iw} x_{ik} \right) \le C_{wk}, \\ x_{ik} \le H y_{ik};\ i = 1,\ldots,M;\ k = 1,\ldots,K, \\ x_{ik} I_{ik} \ge 0;\ i = 1,\ldots,M;\ k = 1,\ldots,K, \\ x_{ik} \{0;1\};\ i = 1,\ldots,M;\ k = 1,\ldots,K, \end{cases} \quad (2)$$

где M – количество изделий; w – объем производственных ресурсов; G_{iw} – установленное время выпуска изделия i; z_{iw} – скорость производства изделия; c_{ik} – потребность в продукции (спрос); J_{ij} – количество единиц изделий i, требующихся при производстве единиц изделий j; E_i – временные интервалы при изготовлении изделий i (простои).

Использование одновременного учета и отслеживания дискретной и непрерывной частей технологической линии позволит решить смешанную задачу оптимизации при линейности и нелинейности системы управления, обеспечивая сквозное цифровое проектирование ПП (рис. 2) [4–7].

Имитационная модель линии технологического монтажа содержит библиотеки, представляющие собой основные этапы ПП изготовления электроники, которые посредством применения интернета вещей и межмашинного взаимодействия позволяют осуществлять передачу данных о состоянии процесса изготовления.

Заключение

Внедрение рассмотренных SPI/AOI/AXI, баз данных (знаний), интернета вещей в процессную структуру автоматического монтажа существенно (ориентировочно – с 2 до 0,5%) снижает долю бракованной продукции. Реализация модели способствует повышению результативности ПП за счет создания комплекса открытой архитектуры с внедрением элементов концепции киберфизических систем в технологическую линию. Модель предназначена

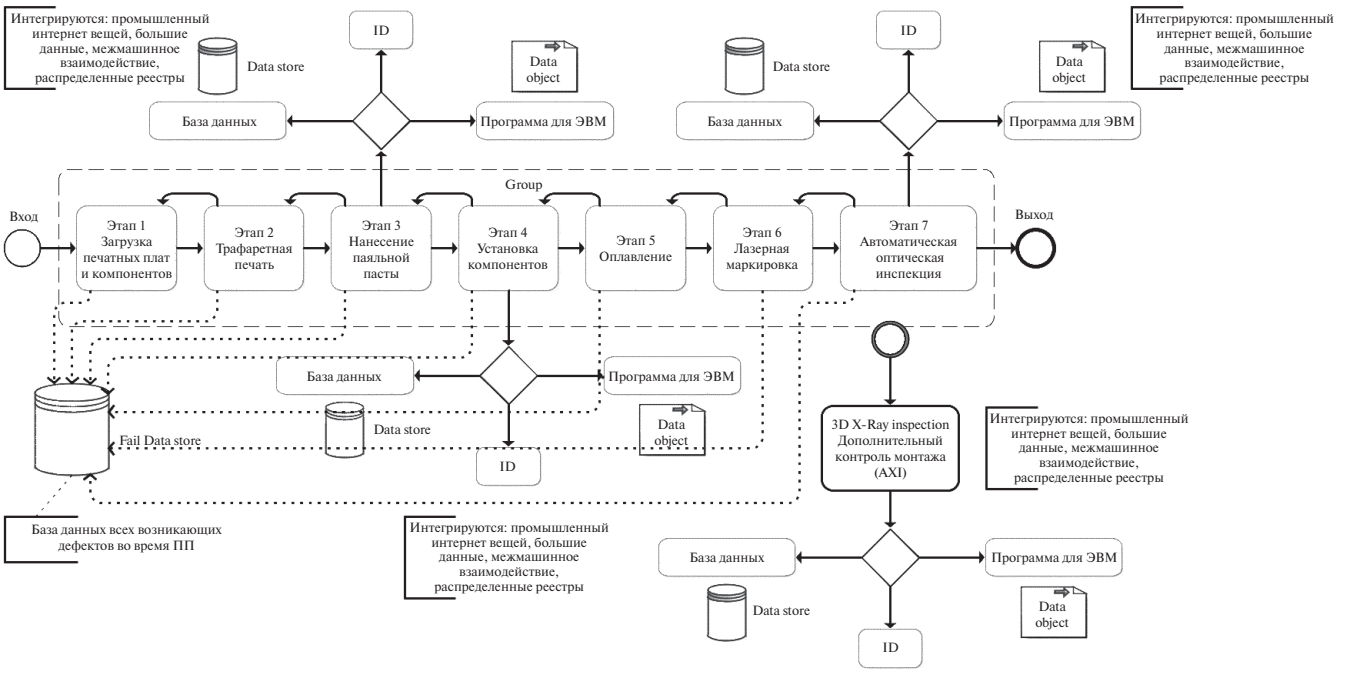


Рисунок 2. Программная реализация методики планирования и управления производственным процессом изготовления радиоэлектроники

для обеспечения интеллектуального межмашинного взаимодействия компонентов оборудования и создания оптимальных алгоритмов функционирования комплексов систем управления процессом автоматического монтажа печатных плат, а также своевременного детального мониторинга, позволяющего выявлять продукцию несоответствующего качества и своевременно диагностировать ненормативные эксплуатационные характеристики оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ № 20-р от 17.01.2020 «Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года».
2. Petrushevskaya A. A. Control model of technological operations of mounting automatic printed circuit boards based on a multiparameter fuzzy classifier // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333. No. 4. 042026.
3. Чохонелидзе А. Н., Богданов Д. В., Ндайисаба Л. Использование методов решения задач оптимизации для соблюдения закона сохранения ресурсов // Программные продукты и системы. 2011. № 2. С. 84–86.
4. Алешкин Н. А., Петрушевская А. А. Совершенствование процесса изготовления и монтажа электроники в условиях организации цифрового производства // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 8. С. 27–30.
5. IPC-Hermes-9852. The Hermes Standard for vendor independent machine-to-machine communication in SMT Assembly. Version 1.1. 2018.
6. Liu X. L., Wang W. M., et al. Industrial blockchain based framework for product lifecycle management in industry 4.0 // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2020. Vol. 63. 101897.
7. Glaroudis D., Iossifides A., Chatzimisios P. Survey, comparison and research challenges of IoT application protocols for smart farming // Computer Networks. 2020. Vol. 168. 107037.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петрушевская Анастасия Андреевна, ассистент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (812) 494-70-55, e-mail: aap@guap.ru.

Алешкин Никита Андреевич, к. т. н., старший преподаватель, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (921) 892-58-57, e-mail: ales_nikita@mail.ru.

For citation: Petrushevskaya A. A., Aleshkin N. A. Model for optimizing production of electronic products. Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 46–50.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-46-50

A. A. Petrushevskaya, N. A. Aleshkin

MODEL FOR OPTIMIZING PRODUCTION OF ELECTRONIC PRODUCTS

The article presents a model for optimizing the process of controlling the production of electronic products, which consists in reducing the share of defective products in the production process through the introduction of IoT and means of machine-to-machine intellectual interaction between equipment components. The introduction of technological innovations in the manufacture of electronics is determined by the need to reduce costs for the prevention and elimination of marriage of finished products, as well as to achieve greater reliability of the products. The elimination of defects in the early stages (when applying solder paste, etc.), which in the future may lead to the appearance of defective end products, is a less expensive process than troubleshooting the final assembly. The implementation of the model helps to increase the efficiency of the production process by creating a complex of open architecture with the introduction of elements of the concept of cyberphysical systems in the production line of automatic installation of printed circuit boards.

Keywords: digital production, automatic installation of radio electronics, technological innovations, machine interaction, process model

REFERENCES

1. Decree of the Government of the Russian Federation No. 20-r dated 17.01.2020 «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya elektronnoi promyshlennosti Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda».
2. Petrushevskaya A. A. Control model of technological operations of mounting automatic printed circuit boards based on a multiparameter fuzzy classifier. *Journal of Physics: Conference Series,* 2019, vol. 1333, no. 4, 042026.
3. Chokhonelidze A. N., Bogdanov D. V., Ndayisaba L. Use of methods for solving optimization problems to comply with the law of conservation of resources. *Programmnye produkty i sistemy,* 2011, no. 2, pp. 84–86. (In Russian).
4. Aleshkin N. A., Petrushevskaya A. A. Improving the manufacturing and installation of electronics in the context of the organization of digital production. *Nauka i biznes: puti razvitiya,* 2019, no. 8, pp. 27–30. (In Russian).
5. IPC-Hermes-9852. *The Hermes Standard for vendor independent machine-to-machine communication in SMT Assembly.* Version 1.1. 2018.

6. Liu X. L., Wang W. M., et al. *Industrial blockchain based framework for product lifecycle management in industry 4.0.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, vol. 63, 101897.
7. Glaroudis D., Iossifides A., Chatzimisios P. Survey, comparison and research challenges of IoT application protocols for smart farming. *Computer Networks,* 2020, vol. 168, 107037.

AUTHORS

Petrushevskaya Anastasia, assistant, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (812) 494-70-55, e-mail: aap@guap.ru.
Aleshkin Nikita, Ph. D., senior tutor of department, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (921) 892-58-57, e-mail: ales_nikita@mail.ru.

Для цитирования: Щеников Я. А., Сидоров В. О. Риск-менеджмент процессов входного контроля электронной компонентной базы // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 51–56.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-51-56
УДК 658.562.42

Я. А. Щеников[1], В. О. Сидоров[1]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РИСК-МЕНЕДЖМЕНТ ПРОЦЕССОВ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

В статье рассматриваются вопросы риск-менеджмента процессов входного контроля приборостроительного предприятия с целью минимизации риска приобретения и случайного использования фальсифицированной электронной компонентной базы. Приведены методы выявления контрафактной элементной базы, которые с точки зрения менеджмента качества можно отнести к корректирующим мероприятиям. Предложена модель выбора предупреждающих действий, основанная на оценке рисков использования фальсифицированных компонентов. Указанные риски оцениваются с использованием разработанных авторами шкал. Далее на основании полученной оценки риска осуществляется выбор предупреждающих мероприятий. Рассмотрены основные типы таких мероприятий, включая выбор надежного поставщика, выбор альтернативных поставщиков, АВС-анализ, изменение конструкции оборудования и резервирование. Новизна предлагаемой методики оценки риска заключается в экономическом обосновании выбора вида предупреждающих мероприятий.

Ключевые слова: *фальсифицированная электронная компонентная база, предупреждающие действия, контрафактные электронные компоненты*

Введение

Проблема присутствия на рынке фальсифицированных и контрафактных электронных компонентов продолжается оставаться актуальной, несмотря на принятие целого семейства международных и гармонизированных с ними российских стандартов, посвященных защите от фальсификаций и контрафакта [1–4]. Между понятиями «сомнительное изделие», «фальсифицированное изделие» и «контрафактное изделие» существует определенная взаимосвязь (рис.). Любой контрафактный электронный компонент является фальсифицированным, но не каждый фальсифицированный компонент является контрафактным. Более того, фальсифицировать компонент может сам его производитель. Сомнительные изделия также могут включать в себя и просто некачественные оригинальные электронные компоненты.

Методы выявления контрафактной элементной базы

Рассмотрим методы выявления контрафактной элементной базы, их сложность и затратность. Эти методы можно отнести к корректирующим мероприятиям с точки зрения менеджмента качества [5].

Проверка документации и визуальный контроль являются самыми простыми и недорогими методами выявления фальсифицированных компонентов, однако круг выявляемых способов фальсификации ограничен перемаркировкой (частично) и восстановленными компонентами (если не было замены кристалла).

Инструментальные электрические методы контроля позволяют с помощью относительно недорогих приборов выявлять такие виды фальсифицированных компонентов, как перемаркировка (частично) и замена кристалла.

Физический разрушающий контроль – достаточно трудоемкий и дорогостоящий метод, однако, он позволяет выявить достаточно большой спектр фальсификаций электронных компонентов, начиная от перемаркировки и заканчивая повторным использованием компонента даже в случае помещения бывшего в употреблении кристалла в новый корпус.

Рисунок. Взаимосвязь между сомнительными, фальсифицированными и контрафактными изделиями [3]

Инструментальный параметрический контроль позволяет выявлять большое число методов фальсификации электронных компонентов, таких как перемаркировка и повторное использование компонента, однако его стоимость обычно высока, в том числе поскольку он требует наличия дорогостоящего специализированного оборудования.

Риск-менеджмент в процессах входного контроля электронных компонентов

Согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2015, помимо корректирующих мероприятий необходимо разрабатывать предупреждающие мероприятия – риск-менеджмент [6]. Аналогично корректирующим мероприятиям, их также следует выбирать, исходя из стоимости внедрения. Риск-менеджмент требует достоверных данных о возможных рисках, которые должны быть идентифицированы и оценены. Для оценки риска удобно использовать методику, которая может быть основана на принципах FMEA-анализа (Failure Mode and Effects Analysis – анализ видов и последствий отказов). FMEA-анализ первоначально использовался для идентификации и оценки рисков, связанных с последствиями отказов узлов и агрегатов автомобилей [7]. В настоящее время область применения FMEA-анализа значительно расширилась, растет и количество оригинальных методик оценки риска на его принципах.

Непосредственно применить стандартный FMEA-анализ в процессах входного контроля электронных компонентов нельзя из-за того, что не подходят разработанные для него шкалы количественной оценки в баллах значимости последствий несоответствия (S), частоты возникновения причины несоответствия (O) и способности обнаружения (D). Оценим риск использования фальсифицированных компонентов с использованием разработанных авторами настоящей статьи шкал (табл. 1–3). Далее

Таблица 1. Шкала оценки возможности приобретения фальсифицированных компонентов

Возможность приобретения фальсифицированных компонентов	Значение показателя *A*
Изготовитель оборудования сам производит компонент	1
Действительный изготовитель компонентов (OCM)	2
Сертифицированный изготовитель компонентов	3
Уполномоченный поставщик (официальный дистрибьютор)	4
Действительный изготовитель оборудования	5
Изготовитель оборудования по контракту	6
Независимый дистрибьютор с высоким качеством, репутацией и необходимыми процедурами	7
Независимый дистрибьютор с неизвестными качеством, репутацией и процедурами	8
Неизвестный источник	9
Имеется отчет с предупреждением о продавце	10

Таблица 2. Шкала оценки критичности применения компонентов

Критичность применения компонентов	Значение показателя *C*
Короткий ожидаемый срок службы или некритичное применение	1–2
Продукция пригодна к ремонту	3–4
Восстановленное или рекламированное изделие	5
Имеется отчет с предупреждением об изделии	6
Ремонт в полевых условиях невозможен	7
Критичные по предназначению	8
Критичные по безопасности	9
От применения зависит жизнь	10

Таблица 3. Шкала оценки последствий выхода из строя оборудования с установленными фальсифицированными компонентами

Последствия выхода из строя оборудования с установленными фальсифицированными компонентами	Значение показателя *O*
Единичные, крайне редкие случаи выхода из строя оборудования, обычно происходящие после окончания срока действия гарантийных обязательств производителя. Вместо вышедшего из строя оборудования потребитель приобретает новое. Финансовые потери отсутствуют. Потеря имиджа и юридические последствия для производителя отсутствуют	1
Единичные, крайне редкие случаи выхода из строя оборудования, не приносящие потребителю и производителю финансовых и юридических проблем. Несложный ремонт на стороне потребителя. Финансовые потери ничтожны. Потеря имиджа и юридические последствия для производителя отсутствуют	2
Выход из строя оборудования привел к небольшим убыткам для потребителя, которые не были переложены на поставщика оборудования. Ремонт на стороне производителя приносит потребителю и производителю небольшие финансовые издержки. Потеря имиджа и юридические последствия для производителя отсутствуют	3
Выход из строя оборудования привел к некоторым убыткам для потребителя, которые частично или полностью были переложены на поставщика оборудования. Ремонт на стороне производителя приносит производителю некоторые финансовые издержки. Юридические последствия для производителя отсутствуют, потеря имиджа производителя незначительна	4
Систематический выход из строя поставленного оборудования и его ремонт обуславливают периодические финансовые издержки потребителя и производителя. При наличии альтернативного поставщика потребитель постарается переключиться на использование его оборудования. Юридические последствия отсутствуют, начинает ухудшаться имидж производителя	5
Вышедшее из строя оборудование подлежит серьезному ремонту производителем, который несет серьезные финансовые издержки. Юридические последствия отсутствуют, однако имидж компании ухудшается	6
Выход из строя поставленного оборудования и его ремонт приводят к остановке производственных участков у потребителя, который терпит из-за этого убытки. Возможны юридические последствия: штрафы, неустойки. Ущерб для имиджа как производителя, так и потребителя оборудования	7
Вышедшее из строя оборудование подлежит серьезному ремонту производителем, который из-за этого несет серьезные финансовые издержки. Потребитель также несет серьезные финансовые издержки. Имеют место юридические последствия для потребителя от его заказчиков. Имиджу производителя и потребителя нанесен урон	8
Вышедшее из строя оборудование подлежит полной замене за счет производителя, который несет серьезные финансовые издержки. Юридические последствия в виде административной ответственности: штрафы, неустойки. Имиджу производителя и потребителя нанесен серьезный урон, на восстановление которого потребуется время	9
Все поставленное оборудование подлежит полной замене за счет производителя, который несет критичные для существования бизнеса финансовые издержки. Серьезные юридические последствия вплоть до уголовного преследования. Потеря имиджа компании, отрасли, государства	10

на основании полученной оценки риска R осуществляется выбор предупреждающих мероприятий (табл. 4):

$$\text{Предупреждающие действия} \begin{cases} \text{Не связанные с изменением конструкции электронного изделия, } R \in 1\ldots125, \\ \text{связанные с изменением конструкции электронного изделия, } R \in 126\ldots1000, \end{cases}$$

где $R = ACO$ – риск использования фальсифицированных компонентов; A – показатель, характеризующий возможность приобретения фальсифицированных компонентов; C – показатель, характеризующий критичность применения компонентов; O – показатель, характеризующий последствия выхода из строя оборудования с установленными фальсифицированными компонентами (табл. 1–3). Шкалы, приведенные в табл. 1 и 2, построены на базе информации, приведенной в стандарте [3], а табл. 3 разработана авторами статьи.

Основной причиной использования электронной компонентной базы сомнительного происхождения является недостаточный выбор надежных поставщиков компонентов на российском рынке и, как следствие, возможный дефицит требуемых компонентов. В табл. 4 приведены рекомендуемые предупреждающие действия, расположенные в порядке возрастания показателя R и стоимости внедрения компонентов.

Выбор надежного поставщика – наиболее простое и логичное решение для снижения риска приобретения фальсифицированных компонентов. Однако всегда возможна ситуация, когда надежный поставщик существует, но поставками требуемой компонентной базы не занимается. Тем не менее все специалисты, работающие в сфере борьбы с фальсифицированной компонентной базой, настоятельно рекомендуют начинать именно с этого.

Выбор альтернативных поставщиков – очевидное решение, если часть используемых компонентов является дефицитным. Однако данное мероприятие требует дополнительных затрат времени на поиски и валидацию альтернативных поставщиков.

ABC-анализ – метод классификации товаров, клиентов и ресурсов по уровню их значимости для предприятия. Рассматривая электронные компоненты как товар, наличие и отсутствие которого, соответственно, снижает или повышает риск приобретения фальсифицированных компонентов, можно управлять этим риском. При этом среди всей требуемой предприятию номенклатуры компонентов выделяются те дефицитные виды, которые следует заблаговременно закупать у надежных поставщиков в достаточном количестве и хранить на складе.

Таблица 4. Рекомендуемые предупреждающие действия по минимизации риска приобретения фальсифицированных электронных компонентов и условия их реализации в зависимости от величины показателя *R*

R = ACO	Рекомендуемые предупреждающие действия	Условия применения предупреждающих действий
1…125	Выбор надежного поставщика	Во всех случаях
	Выбор альтернативных поставщиков	Если используемый компонент является дефицитным
	ABC-анализ используемой компонентной базы	Если критически важно вовремя выполнять заказы
126…1000	Изменение конструкции оборудования	Если потребители часто требуют модифицировать конструкцию оборудования
		Если возможно санкционное давление на зарубежных поставщиков электронных компонентов
	Повышение надежности, холодный, ждущий, горячий резерв низкой кратности: однократный или двукратный	Если оборудование предназначено для ответственных применений и с возможностью обслуживания (военное, обслуживаемое космическое, медицинское, производственное)
	Повышение надежности: ждущий, горячий резерв высокой кратности	Если оборудование необслуживаемое, уникальное, например приборы для научных исследований в космосе

Изменение конструкции оборудования – внесение изменений в конструкторскую документацию для обеспечения возможности применения альтернативных компонентов одного типа, но разных производителей, или даже разных типов. Наибольший экономический эффект от этого мероприятия достигается, когда изменения не вносятся в уже существующую документацию и возможность применения альтернативных компонентов закладывается уже на этапе проектирования оборудования.

К мероприятиям по повышению надежности оборудования относится, например, резервирование. Количество логических блоков в современных ПЛИС исчисляется тысячами, что позволяет резервировать электронные функциональные узлы и отключать их автоматически по мере выхода из строя. Работа электронных компонентов в «щадящих» режимах или использование компонентов с лучшими параметрами, чем требуется по условиям функционирования, – эти мероприятия могут обеспечить запас прочности на случай случайного приобретения и использования партии фальсифицированных компонентов.

Заключение

Новизна предлагаемой авторами методики оценки риска заключается в том, что она позволяет обосновать с экономической точки зрения выбор вида предупреждающего действия. Ввиду того, что многие специалисты знакомы с FMEA-анализом, освоение предлагаемой оригинальной методики не должно вызывать сложности. Ее применение позволит создавать системы риск-менеджмента, устойчивые к присутствию на рынке фальсифицированной электронной компонентной базы.

В 2019 году были утверждены новые стандарты, посвященные таким вопросам разработки системы защиты, как методы приобретения аутентичных материалов, методы обеспечения и контроля аутентичности продукции и документов, обеспечение прослеживаемости оборота продукции, требования к дистрибьюторам по защите от фальсификаций и контрафакта (ГОСТ Р 58634–2019, ГОСТ Р 58635–2019, ГОСТ Р 58636–2019, ГОСТ Р 58638–2019 соответственно) [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guin U., Huang K., et al. Counterfeit integrated circuits: a rising threat in the global semiconductor supply chain // Proc. IEEE. 2014. No. 8 (102). P. 1207–1228.
2. Ершов Л., Левин Р. и др. Что такое контрафакт и как с ним бороться. Нормативная основа и практика выявления контрафактных электронных компонентов // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2016. № 6. С. 88–93.
3. ГОСТ Р 57880–2017. Система защиты от фальсификаций и контрафакта. Электронные изделия. Предотвращение получения, методы обнаружения, сокращение рисков применения и решения по использованию фальсифицированной и контрафактной продукции. М.: Стандартинформ, 2017. 40 с.
4. ГОСТ Р 57882–2017. Система защиты от фальсификаций и контрафакта. Изделия электронные. Критерии верификации для оценки соответствия практики и методов организаций требованиям по противодействию обороту фальсифицированной и контрафактной продукции. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.
5. Tehranipoor M., Guin U., Forte D. Counterfeit integrated circuits. Detection and avoidance. Springer, 2015. 269 p.
6. ГОСТ Р ИСО 9001–2015 Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.
7. Крайслер Корпорэйшн, Форд Мотор Компани, Дженерал Моторс Корпорэйшн. Анализ видов и последствий потенциальных отказов. Н. Новгород: НИЦ КД, Приоритет, 1997. 67 с.
8. Кононов В.К., Ершов Л.А., и др. Новые стандарты в области подтверждения соответствия и предотвращения контрафакта и подделок // Петербургский журнал электроники. 2015. № 1 (82). С. 30.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Щеников Ярослав Алексеевич, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (911) 216-00-08, e-mail: yar2409@mail.ru.

Сидоров Вячеслав Олегович, магистрант, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (812) 494-70-55.

For citation: Shchenikov Ya. A., Sidorov V. O. Risk management of electronic component incoming inspection processes. Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 51–56.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-51-56

Ya. A. Shchenikov, V. O. Sidorov

RISK MANAGEMENT OF ELECTRONIC COMPONENT INCOMING INSPECTION PROCESSES

The article considers the issues of risk management of incoming inspection processes of an instrument-making enterprise in order to minimize the risk of acquisition and accidental use of falsified electronic components. Methods for identifying counterfeit components are described, which from the point of view of quality management can be attributed to corrective measures.

A model for selecting preventive actions based on the risk assessment of using falsified components is proposed. These risks are assessed using the scales developed by the authors. Further, based on the obtained risk assessment, a selection of preventive measures is carried out. The main types of such events are considered, including choosing a reliable supplier, choosing alternative suppliers, ABC analysis, changing the design of equipment and redundancy. The novelty of the proposed methodology for risk assessment is the economic justification for choosing the type of preventive measures.

Keywords: falsified electronic components, preventive actions, counterfeit electronic components

REFERENCES

1. Guin U., Huang K., et al. Counterfeit integrated circuits: a rising threat in the global semiconductor supply chain. *Proc. IEEE,* 2014, no. 8 (102), pp. 1207–1228.
2. Ershov L., Levin R. et al. What is counterfeit and how to deal with it. The regulatory framework and the practice of identifying counterfeit electronic components. *Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes,* 2016, no. 6, pp. 88–93. (In Russian).
3. GOST R57880–2017. *System of protection against fraud and counterfeiting. Electronic parts. Avoidance, detection, mitigation and disposition of fraudulent/counterfeit parts.* Moscow, Standartinform Publ., 2017, 40 p. (In Russian).
4. GOST R57882–2017. *System of protection against fraud and counterfeiting. Electronic parts. Verification criteria for conformity assessment of practice and methods of organizations to the protection against fraud and counterfeiting requirements.* Moscow, Standartinform Publ., 2017, 12 p. (In Russian).
5. Tehranipoor M., Guin U., Forte D. *Counterfeit integrated circuits. Detection and avoidance.* Springer, 2015, 269 p.
6. GOST R ISO 9001–2015. *Quality management systems. Requirements.* Moscow, Standartinform Publ., 2015, 24 p. (In Russian).
7. Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation. *Analiz vidov i posledstvii potentsialnykh otkazov* [Analysis of the types and consequences of potential failures]. Nizhny Novgorod, NITs KD Publ., Prioritet Publ., 1997, 67 p. (In Russian).
8. Kononov V. K., Ershov L. A., et al. New standards in the field of confirmation of compliance and prevention of counterfeit and fakes. *Peterburgskii zhurnal elektroniki,* 2015, no. 1 (82), p. 30. (In Russian).

AUTHORS

Shchenikov Yaroslav, Ph. D., associate professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (911) 216-00-08, e-mail: yar2409@mail.ru.
Sidorov Vyacheslav, undergraduate, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (812) 494-70-55.

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

К рассмотрению принимаются нигде не опубликованные ранее рукописи статей с оригинальными результатами теоретических и экспериментальных исследований в области радиоэлектроники. Максимальный объем статьи – 23 000 печатных знаков (с пробелами), включая формулы, иллюстрации, таблицы.

Обязательными являются следующие элементы статьи:

- **Тематическая рубрика журнала,** к которой должна быть отнесена статья.
- Индекс **УДК**.
- **Название статьи,** максимально конкретное и информативное, на русском и английском языках.
- **Ф.И.О. всех авторов** (полностью) на русском и английском языках.
- **Информация об авторах** на русском и английском языках: регалии; место работы (полное и сокращенное название организации, почтовый адрес с указанием города и почтового индекса), должность; электронный адрес; телефон. Если авторов несколько, то информация должна быть представлена по каждому из них.
- **Аннотация статьи** на русском и английском языках. В аннотации подчеркивается новизна и актуальность темы (без повтора заглавия статьи в тексте аннотации). Аннотация статьи должна быть информативной и подробной, описывать методы и главные результаты исследования. Из аннотации должно быть ясно, какие вопросы поставлены для исследования и какие ответы на них получены. Предпочтительна структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты/обсуждение, заключение/выводы. Объем аннотации составляет 100–200 слов.
- **Ключевые слова** на русском и английском языках. Должны отражать основное содержание статьи, но, по возможности, не повторять ее название. Рекомендуемый объем – 3–6 слов или коротких словосочетаний.
- **Основной текст статьи.** Следует соблюдать единообразие терминов, а также единообразие в обозначениях, системах единиц измерения, номенклатуре. Следует избегать излишних сокращений, кроме общеупотребительных. Если сокращения все-таки используются, то они должны быть расшифрованы в тексте при первом упоминании.
- **Список литературы,** на русском и английском языках. Должен в достаточной мере отражать современное состояние исследуемой области и не быть избыточным. Должен содержать ссылки на доступные источники. Не цитируются тезисы, учебники, учебные пособия, диссертации без депонирования. Допустимый объем самоцитирования автора не более 20% от источников в списке литературы.
- **Список иллюстраций** должен располагаться в конце статьи и содержать названия статей и подписи, размещенные на рисунке.

Правила оформления статей

Материалы статьи представляются для публикации в электронном виде.

В состав электронной версии статьи должны входить текстовая часть в формате MS Word (формулы в MathType), а также иллюстрации в виде отдельных графических файлов (каждый файл должен содержать один рисунок).

Статья представляется в итоговом варианте, т.е. не предполагает существенных авторских изменений и дополнений, а также не содержит исправлений, отображаемых на полях или в тексте работы.

Английский блок должен включать (в указанном порядке): заголовок статьи, Ф.И.О. всех авторов, аннотацию, ключевые слова, список литературы в романском алфавите.

Графический материал

Все иллюстрации должны быть черно-белыми.

Иллюстрации для каждой статьи должны находиться в отдельной папке с названием статьи; название файла должно включать номер рисунка. Каждый файл должен содержать только один рисунок.

Параметры иллюстраций:

- форматы *.tif или *.eps;
- цветовая модель Grayscale (Black 95%), разрешение 300 dpi при 100%-ной величине;
- цветовая модель Bitmap, разрешение не ниже 600 dpi;
- толщины линий не менее 0,5 point;
- не следует использовать точечные закраски в программах работы с векторной графикой, таких как Noise, Black&white noise, Top noise;
- не следует добавлять сетку или серый фон на задний план графиков и схем;
- желательно иллюстрации предоставлять в двух вариантах (первый – со всеми надписями и обозначениями, второй – без текста и обозначений);
- все надписи на рисунках и названия рисунков обязательно (!) должны быть набраны текстом и располагаться на отдельной странице в текстовой части статьи.

Текст статьи

Текст должен быть в формате MS Word; набран через двойной интервал; шрифтом Times New Roman, размер шрифта – 12 пунктов.

Не следует вводить больше одного пробела подряд (в том числе при нумерации формул). Используйте абзацный отступ и табуляцию.

Подзаголовки должны быть без нумерации.

Таблицы представляются в формате MS Word. Их следует располагать в тексте непосредственно после ссылки на таблицу.

В тексте статьи должны быть ссылки на все рисунки и таблицы. Если в статье один рисунок и/или таблица, номер не ставится. Рисунки с цифро-буквенной нумерацией обозначаются в тексте без запятой и пробела (например, рис. 1а).

В шапке таблицы пустых ячеек быть не должно.

В таблице не должно быть графы с порядковым номером. Если нумерация строк необходима, то порядковый номер указывается непосредственно перед текстом.

При отсутствии данных в ячейках должны быть прочерки (т.е. пустых ячеек быть не должно).

Подписи к рисункам должны содержать расшифровку всех обозначений, использованных на рисунке.

На отдельном листе в конце статьи должны быть набраны названия рисунков с подписями, а также текст, размещенный на рисунках.

Формулы и буквенные обозначения

Все формулы должны быть набраны только (!) в математическом редакторе MathType с настройками строго (!) по умолчанию. Не допускается набор из составных элементов (часть – текст, часть – математический редактор). Не допускается также вставка формул в виде изображений. Формулы располагают по месту в тексте статьи.

По возможности следует избегать «многоэтажных» формул. В частности, в сложных формулах экспоненту рекомендуется представлять как «exp».

Дроби предпочтительно располагать отдельной строкой, числитель от знаменателя отделять горизонтальной чертой.

В десятичных дробях для отделения целой части используется запятая (например, 10,5).

В качестве знака умножения используется символ точка (·), при переносе формулы в качестве знака умножения следует использовать символ крест (×).

Знак умножения в формулах ставится только (!) перед цифрой и между дробями.

В формулах и тексте скалярные величины, обозначаемые латинскими буквами, набираются курсивом, обозначаемые греческими буквами – прямым шрифтом. Для обозначения векторных величин используется прямой полужирный шрифт, стрелка вверху не ставится.

Одиночные буквы или символы, одиночные переменные или обозначения, у которых есть только верхний или только нижний индекс, единицы измерения и цифры в тексте, а также простые математические и химические формулы следует набирать в текстовом режиме без использования внедренных рамок (т.е. без использования математических редакторов).

Слова «минус» и «плюс» перед цифрами обозначаются знаками (например, +4; –6).

Размерности

Размерности отделяются от числа пробелом, кроме градусов, процентов, промилле.

Для сложных размерностей допускается использование как отрицательных степеней, так и скобок. Главное условие – соблюдение единообразия написания одинаковых размерностей по всему тексту и в иллюстрациях.

При перечислении, а также в числовых интервалах размерность приводится только после последнего числа (например, 18–20 кг), за исключением угловых градусов.

Числовой диапазон оформляется коротким тире без пробелов (например, 18–20).

Размерности переменных пишутся после их обозначений через запятую, а не в скобках.

Список литературы

В журналах принимается Ванкуверская система цитирования – последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их упоминания в тексте, таблицах и рисунках. Единый список литературы оформляется также в порядке упоминания в тексте.

На все работы, включенные в список литературы, должна быть ссылка в тексте.

Допустимый объем самоцитирования автора не более 20% от источников в списке литературы.

Не цитируются:

- тезисы, учебники, учебные пособия;
- диссертации без депонирования.

Единый список литературы на русском языке размещают в конце текста статьи и озаглавливают «Список литературы».

Единый список литературы в романском алфавите (латинице) размещают в англоязычном блоке после ключевых слов (Keywords) и озаглавливают References.

В тексте статьи ссылки приводят квадратных скобках: [1–5] или [1, 3, 5].

Источники приводят на языке оригинала. Русские – на русском, англоязычные – на английском.

Пример оформления статьи из периодического издания:

Таран П.П., Иванов А.А. Глобализация и трудовая миграция: необходимость политики, основанной на правах человека // Век глобализации. 2010. № 1. С. 66–88.

Пример оформления книги:

Костылева Л.В. Неравенство населения России: тенденции, факторы, регулирование. М.: ИСЭРТ РАН, 2011. 200 с.

Пример оформления электронного источника:

Костылева Л.В. Неравенство населения России: тенденции, факторы, регулирование [Электронный ресурс]. М., 2011. 30 с. Адрес доступа: http://elsevierscience.ru/

Подписи к рисункам

На отдельном листе должны быть набраны (в порядке упоминания в тексте) порядковый номер рисунка, его название, а также все надписи, расположенные на рисунке. Подписи к рисункам должны содержать расшифровку всех обозначений, использованных на рисунке.

Комплект предоставляемых материалов

Комплект материалов рукописи статьи должен включать электронную версию статьи; иллюстрации в виде отдельных графических файлов; экспертное заключение о разрешении публикации материалов в открытом доступе.

Материалы следует загружать через электронную форму на сайте **vre.instel.ru**.

RULES FOR SUBMITTING ARTICLES

Accepted for consideration manuscript with original results of theoretical and experimental research in the field of electronics with no publishing record. The maximum amount of 23000 articles printed characters (with spaces), including formulas, illustrations, tables.

The mandatory elements of the articles are the following:

- Thematic heading of magazine to which article should be carried
- Index of the universal decimal classification.
- The name of article, at the most specific and informative, in Russian and English languages.
- The information on authors, in Russian and English languages: regalia; place of job (the full and shorthand name of the organization, the post address with the indication of city and the postal index), a position; the electronic address; phone. If there're few authors then the information should be presented on each of them.
- The summary of article in Russian and English languages. Novelty and a urgency of subject matter (without repetition of the title of article in the text of the summary) should be emphasized in the summary. The summary of article have to be informative and detailed, describe methods and the main results of research. The summary has to cover what questions are put for research and the answers to them are received. The structure of the summary has to repeat structure of article and including introduction, objectives and problems, methods, results/discussions, the conclusion/conclusions is preferential. The volume of the summary makes 100–200 words.
- Key words in Russian and English languages. Should reflect the main content of the article, but if possible not to repeat its name. The recommended amount – 3–6 words or short phrases.
- The main text of the article. The uniformity of terms should be observed as well as uniformity in the notation, systems of units, nomenclature. Avoid unnecessary abbreviations commonly used in addition. If the abridgement is still used then it must be transcribed in the text at the first mention.
- References in English and Russian languages. Must adequately reflect the current state of the study area and not be excessive. Must contain references to available sources. Not quoted theses, textbooks, manuals, thesis without deposit. The allowable amount of self-citation of the author should not exceed 20% of the sources in the bibliography.
- The list of illustrations should be placed down in the end of article and contain names of articles and the signatures placed in picture.

Formalized rules for articles

Materials of the Articles are submitted for publication in electronic form.

The electronic version of the paper should include the text portion in MS Word format (formulas in MathType), as well as illustrations as separate image files (each file should contain one figure).

The article appears in the final version and copyright does not involve significant changes and additions, as well as does not include patches that are displayed in the fields or in the text of the work.

English unit should include (in indicated order): title of the article, name all authors, abstract, keywords, references in the Roman alphabet.

Graphical material

All illustrations should be in black and white.

Illustrations for each article must be in a separate folder with the title of the article; File name should include the figure number. Each file must contain only one drawing.

illustrations parameters:

- formats *.tif or *.eps;
- color model Grayscale (Black 95%), the resolution of 300 dpi at 100% value;
- color model Bitmap, resolution of at least 600 dpi;
- Lines's thickness of not less than 0,5 point;
- It is not necessary to use dot shadings in programs of work with vector graphics, such as Noise, Black*white noise, Top noise
- It is not necessary to add a grid or a grey background on a background of charts and diagrams;
- it is desirable to provide the illustrations in two versions (the first – with all the inscriptions and symbols, the second – without text and symbols);
- All signs in the figures and the names of figures is obligatory (!) Should be typed in the text and placed on a separate page in the text of the article.

The text of article

The text should be in MS Word format; typed double-spaced; font Times New Roman, font size – 12 points.

Do not enter more than one space in a row (including the numbering of formulas). Use indentation and tabs.

Subtitles should be without numbering.

Tables submitted in MS Word format. They should be placed in the text immediately following the reference to the table.

The text of the article should be a reference for all figures and tables. If an article of one figure and / or table number is not assigned. Figures alphanumeric numbering are indicated in the text without a comma and a space (for example, Fig. 1a).

In the header of the table empty cells should not be.

The table should not have graphs with a serial number. If line numbering is needed, the serial number is indicated immediately before the text.

In the absence of data in the cells must be dashes (empty cells should not be).

Captions should include decoding of symbols used in the figure.

On a separate sheet at the end of the article should be typed in the names of images with captions, and also the text that appears in the figures.

Formulas and letter designations

All formulas should be typed only (!) In MathType mathematical editor. Not allowed set of constituents (Part – text part – mathematical editor). There can be no insert formulas in the form of images. Formula for a place in the text.

If possible, avoid «multi-storey» formulas. In particular, complex formulas recommended exponent of as «exp».

Fractions are preferably arranged separately, the numerator by the denominator separated by a horizontal line.

In decimal fractions to separate the integer part of a comma (eg 10,5).

As a sign of multiplication using the dot (·), when transferring the formula should use the cross symbol (×) as a multiplication sign.

The multiplication sign in the formulas is put only (!) before a figure between fractions.

In the formulas and text scalar quantities, denoted by Latin letters, italicized, denoted by Greek letters – font. To indicate vector quantities used straight bold, arrow at the top is not put.

Single letters or symbols, single variables or symbols that have only the upper or only the lower the index, units, and figures in the text, as well as simple mathematical and chemical formulas should be typed in text mode without the use of embedded frames (ie, without the use of Mathematical editors).

The words «minus» and «plus» to the numbers indicated by signs (eg 4, –6).

Dimensions

Dimensions are separated from the number by a space, except degrees, percent, per mille.

For complex dimensions allowed as the negative powers, and parentheses. The main condition – that the consistency of writing the same dimensions throughout the text and illustrations.

In the listing, as well as the dimension of the numerical ranges given only after the last day (e.g. 18–20 kg) except angular degrees.

A numeric range is made short dash without spaces (for example, 18–20).

The dimensions of the variables are written after the notation, separated by commas, but not in parentheses.

Bibliography

The magazines use the Vancouver citation system – consistent numerical style: links are numbered in the course of their appearance in the text, tables and figures. A single list of references is also executed in the order mentioned in the text.

All work included in the list of references should be referenced in the text.

The allowable amount of self-citation is not the author of more than 20% of the sources in the bibliography.

Do not quoted:

- theses, textbooks, teaching aids;
- dissertation without deposit.

A unified list of literature in Russian is placed at the end of the text and the headline «References».

A unified list of references in the Roman alphabet (Roman alphabet) are placed in an English-speaking unit after keywords (CET Keywords) and headline References.

The text of the article links lead brackets: [1–5] or [1, 3, 5].

Sources of lead in the original language. Russian – Russian, English language – English.

A sample of articles from periodicals:

Taran P. P., Ivanov A. A. Globalization and labor migration: the need for a policy based on human rights // Century of Globalization. 2010. № 1. pages 66–88.

Formalizing example for the book

Kostyleva L. V. Inequality of the Russian population: trends, factors that regulation. M.: ISERT RAS, 2011. 200 p.

Example of electronic sources:

Kostyleva L. V. Inequality population of Russia: tendencies, factors, regulation [electronic resource]. M., 2011. 30 p. Access Location: http://elsevierscience.ru/

Signatures to pictures

On a separate sheet should be typed (in order of appearance in the text) the serial number of the picture, its name, as well as all the inscriptions located in the picture. Captions should include decoding of symbols used in the figure.

The complete set of provided materials

The complete set of materials of the manuscript of article should include the electronic version of article; illustrations in the form of separate graphic files; expert opinion on the permission of the materials publication in open access.

Materials should be submit online **vre.instel.ru**.

ЦНИИ «ЭЛЕКТРОНИКА»

МИНПРОМТОРГ РОССИИ

INRADEL

МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОГРАММА ПОДДЕРЖКИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Приглашаем к сотрудничеству технологические компании отрасли в работе с лучшими молодыми кадрами и инновационными проектами!

С марта по сентябрь

Шесть лет мы превращаем технические идеи студентов, аспирантов и молодых ученых в «железные» стартапы – обучаем основам технологического предпринимательства, выбираем лучших наставников и экспертов отрасли, формируем команды и выдаем гранты на развитие разработок.

Программа проводится в формате ежегодного Международного конкурса научно-технических проектов «Инновационная радиоэлектроника».

Цели

- Поиск и отбор лучших управленческих и инженерных кадров радиоэлектронной отрасли.
- Реализация проектов совместно с предприятиями отрасли.
- Развитие культуры молодежного технологического предпринимательства.

Цифры

6 лет

35 регионов России, СНГ, Европы, Китая

990 проектов

1874 участника

Новинка программы

Лучшие проекты сезона примут участие в российско-китайской премии индустриальных инноваций INNOVATION AWARDS 2020.

РЕКЛАМА

www.inradel.ru | konkurs@inradel.ru | Тел. 8 (495) 940-65-00 (доб. 1158, 1162)