

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 74159 от 02.11.2018).

**Учредитель:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Подписной индекс в «Каталоге периодических изданий. Газеты и журналы» ГК «Урал Пресс» - 41891. Физические лица могут оформить подписку в интернет-магазине «Деловая пресса» <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

Журнал «Вестник Воронежского государственного технического университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал выходит шесть раз в год

#### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Главный редактор В.Р. Петренко**, д-р техн. наук – Воронеж

**Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов**, д-р техн. наук – Воронеж

**Ответственный секретарь Ю.В. Татаренко** – Воронеж

#### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

В.Н. Бурков – д-р техн. наук – Москва;  
Д.А. Новиков – д-р техн. наук – Москва;  
С. Лухан-Мора – проф. – Испания;  
А.К. Погодаев – д-р техн. наук – Липецк;  
А.Ф. Тузовский – д-р техн. наук – Москва;  
С.Л. Подвальный – д-р техн. наук – Воронеж;  
В.Л. Бурковский – д-р техн. наук – Воронеж;  
В.В. Куц – д-р техн. наук – Курск;  
А.Г. Ивахненко – д-р техн. наук – Курск;  
В.П. Смоленцев – д-р техн. наук – Воронеж;  
С.Г. Бишутин – д-р техн. наук – Брянск;  
В.В. Пешков – д-р техн. наук – Воронеж;  
О.Н. Кириллов – д-р техн. наук – Воронеж;  
О.Ю. Макаров – д-р техн. наук – Воронеж;  
В.П. Пашинцев – д-р техн. наук – Ставрополь;  
Ю.Г. Пастернак – д-р техн. наук – Воронеж;  
Ю.С. Балашов – д-р физ.-мат. наук – Воронеж;  
А.В. Ашихмин – д-р техн. наук – Воронеж;  
П.П. Чураков – д-р техн. наук – Пенза;  
А.А. Гладких – д-р техн. наук – Ульяновск;  
А.В. Башкиров – д-р техн. наук – Воронеж

Ответственность за подбор и изложение фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений несут авторы публикаций. Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке статей ссылка на журнал обязательна.

**Адрес редакции:** 394026, Воронеж, Московский проспект, дом 14, комн. 212

**Телефон:** +7 (473) 246-28-63

**E-mail:** [vestnik@vorstu.ru](mailto:vestnik@vorstu.ru)

**Издатель:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

**Адрес издателя:** 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021

12+

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration certificate PI № FS 77 – 74159 02 November 2018)

**Founder:** Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Subscription index in the «Catalog of periodicals. Newspapers and magazines» of the «Ural Press» Group of Companies – 41891. Individuals can subscribe to it in the online store "Business Press" <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

The journal "Bulletin of Voronezh State Technical University" is included into the list of peer-reviewed editions in which the results of dissertations for obtaining degrees of a Full Doctor and PhD are published.

The journal is published six times a year

#### **EDITORIAL BOARD:**

**Editor-in-Chief V.R. Petrenko**, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh  
**Deputy Editor-in-Chief I.G. Drozdov**, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

**Executive secretary Yu.V. Tatarenko** – Voronezh

#### **MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:**

V.N. Burkov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;  
D.A. Novikov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;  
Sergio Lujan Mora – Professor – Spain;  
A.K. Pogodaev – Dr. Sc. (Tech.) – Lipetsk;  
A.F. Tuzovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;  
S.L. Podvalny – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
V.L. Burkovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
V.V. Kuts – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;  
A.G. Ivakhnenko – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;  
V.P. Smolentsev – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
S.G. Bishutin – Dr. Sc. (Tech.) – Bryansk;  
V.V. Peshkov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
O.N. Kirillov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
O.Yu. Makarov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
V.P. Pashintsev – Dr. Sc. (Tech.) – Stavropol;  
Yu.G. Pasternak – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
Yu.S. Balashov – Dr. Sc. (Phys. and Math.) – Voronezh;  
A.V. Ashihmin – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
P.P. Churakov – Dr. Sc. (Tech.) – Penza;  
A.A. Gladkikh – Dr. Sc. (Tech.) – Ulyanovsk;  
A.V. Bashkirov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

The authors of publications are responsible for the selection and presentation of facts, quotations, statistics and other information. The articles coming to the editorial office are reviewed. The opinion of the editors may not coincide with the opinion of the authors of the materials. When reprinting articles, the link to the journal is obligatory.

**Address:** 394026, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 212

**Phone number:** +7(473)246-28-63

**E-mail:** [vestnik@vorstu.ru](mailto:vestnik@vorstu.ru)

**Publisher:** Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

**Publisher address:** 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84

© Voronezh State Technical University, 2021

12+

**ПЕШКОВ  
ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ**



**ПОЗДРАВЛЯЕМ!**

***22 ноября 2021 года  
исполнилось 80 лет  
одному из выдающихся сотрудников  
Воронежского государственного  
технического университета, доктору  
технических наук, профессору  
кафедры технологии сварочного  
производства и диагностики***

Владимир Владимирович Пешков родился 22 ноября 1941 года. После службы в армии окончил Воронежский политехнический институт в 1970 году по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Владимир Владимирович работал в НИАТ, а с 1975 года - в ВПИ-ВГТУ, заведовал кафедрой «Оборудование и технологии сварочного производства» с 1993 по 2015 гг. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование некоторых физико-механических свойств титановых сплавов применительно к сварке в твердой фазе» в 1974 году, а в 1987 состоялась защита его докторской диссертации в Институте электросварки им. Е.О. Патона

Национальной академии наук Украины в Киеве.

Профессор В.В. Пешков более 40 лет активно занимается научной и педагогической работой. Его научная деятельность связана с решением проблемы создания теоретических и технологических основ получения тонкостенных слоистых конструкций, применение которых обеспечивает снижение массы летательных аппаратов, охлаждение или обогрев их узлов, шумопоглощение и т.д. Полученные результаты позволили впервые в мире разработать и реализовать технологию диффузионной сварки титановых конструкций с сотовым наполнителем, камер сгорания жидкостных ракетных двигателей, крыльчаток турбонасосных агрегатов.

В целом вклад Пешкова В.В. в разработку новейших технологий как автора более 300 печатных (в том числе монографий) научных трудов и 30 изобретений в области сварки, а также его успехи в педагогической деятельности по подготовке научных и производственных кадров ставят его в ряд ведущих учёных и преподавателей нашего университета и по праву отмечены званием Заслуженного работника высшего образования.

Владимир Владимирович внес весомый вклад в сохранение и развитие научно-технического потенциала нашей страны, подготовив за десятилетия работы сотни специалистов сварочного производства, создал научную школу кафедры и подготовил десятки кандидатов и докторов наук.

**Редакция журнала и коллеги сердечно поздравляют Владимира Владимировича с юбилеем и желают ему здоровья, благополучия и успехов в научной деятельности!**

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика, вычислительная техника и управление

Структура информационной системы поддержки принятия решений оператором АЭС <b>М.Е. Ушков, В.Л. Бурковский.....</b>	<b>8</b>
Разработка программного обеспечения для визуализации трехмерных поверхностей в веб-браузере <b>К.Г. Резников, С.Н. Медведев.....</b>	<b>13</b>
Разработка распределенной информационно-вычислительной системы управления ядерным блоком на Нововоронежской АЭС <b>Д.С. Синюков, А.Д. Данилов, А.А. Самодеенко, А.А. Иванников.....</b>	<b>20</b>
Технология визуализации объектов дополненной реальности, зависящих от геоинформационных данных <b>А.А. Коротышева, С.Н. Жуков.....</b>	<b>28</b>
Параметрическая идентификация дифференциальной модели теплообмена в газификаторе <b>С.В. Бородкин, И.Л. Батаронов, А.В. Иванов, В.И. Рязских.....</b>	<b>34</b>
Алгоритмы выбора навигационных космических аппаратов при решении навигационной задачи <b>В.О. Жилинский, Л.Г. Гагарина.....</b>	<b>43</b>
Многофункциональная система сбора данных для контроля состояния технических средств <b>Г.В. Петрухнова, И.Р. Болдырев.....</b>	<b>56</b>
Система обеспечения автоматической навигации беспилотного летательного аппарата в окрестности аэродрома <b>Д.А. Смирнов, В.Г. Бондарев, А.В. Николенко.....</b>	<b>62</b>
Использование блочного псевдообращения в последовательной обработке данных <b>Е.П. Трофимов.....</b>	<b>69</b>

### Радиотехника и связь

Применение технологии плазменных антенн для повышения скрытности радиосвязи в VHF диапазоне <b>И.А. Баранников, Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров.....</b>	<b>76</b>
Современные подходы к диагностике и ремонту маломощных импульсных источников питания <b>М.А. Ромашенко, А.В. Гудков.....</b>	<b>81</b>
Методика нахождения потерь в обмотке дросселя вследствие скин-эффекта и эффекта близости <b>А.А. Моисеенко, С.М. Фёдоров.....</b>	<b>87</b>
Разработка модулей калибровки комплекса оценки влияния электромагнитных помех на электронные средства <b>Д.А. Пухов, А.В. Суворин, Д.В. Васильченко, М.А. Ромашенко .....</b>	<b>95</b>
Многолучевая антенная система УКВ-диапазона на основе линзы из гранитного щебня <b>В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Федоров.....</b>	<b>100</b>

**Машиностроение и машиноведение**

Комбинированные технологии изготовления деталей в твердых электролитах <b>В.П. Смоленцев, А.А. Извеков.....</b>	<b>107</b>
Анализ технологических возможностей двухкамерных импульсных устройств для листовой штамповки <b>А.Ю. Боташев, А.А. Мусаев.....</b>	<b>111</b>
Выявление влияния пространственной ориентации наплавленных слоев, а также коэффициента их перекрытия на погрешность формы поверхности при аддитивном формообразовании электрической дугой <b>А.Н. Гречухин, В.В. Куц, П.С. Щербаков.....</b>	<b>118</b>

## CONTENTS

### Informatics, computer engineering and control

Structure of the decision support information system by the NPP operator <b>M.E. Ushkov, V.L. Burkovskiy</b> .....	8
Software development for rendering three-dimensional surfaces in a WEB browser <b>K.G. Reznikov, S.N. Medvedev</b> .....	13
Development of a distributed information and computing control system for the nuclear unit at Novovoronezh NPP <b>D.S. Sinyukov, A.D. Danilov, A.A. Samodeenko, A.A. Ivannikov</b> .....	20
Visualization technology of augmented reality objects, depending on geoinformational data <b>A.A. Korotysheva, S.N. Zhukov</b> .....	28
Parametric identification of the differential model of heat exchange in a gasifier <b>S.V. Borodkin, I.L. Bataronov, A.V. Ivanov, V.I. Ryazhskikh</b> .....	34
Satellite selection algorithms for positioning, navigation and timing users <b>V.O. Zhilinskiy, L.G. Gagarina</b> .....	43
Multifunctional data collection system for monitoring the state of technical facilities <b>G.V. Petrukhnova, I.R. Boldyrev</b> .....	56
System for providing automatic navigation of an unmanned aerial vehicle in the vicinity of an airfield <b>D.A. Smirnov, V.G. Bondarev, A.V. Nikolenko</b> .....	62
Using block pseudoreversion in sequential data processing <b>E.P. Trofimov</b> .....	69

### Radio engineering and communication

Application of plasma antenna technology to improve radio communication stealth in VHF band <b>I.A. Barannikov, E.A. Ishchenko, S.M. Fyedorov</b> .....	76
Modern approaches to diagnostics and repair of low-power switching power supplies <b>M.A. Romashchenko, A.V. Gudkov</b> .....	81
Method of finding losses in the throttle winding as a result of the skin effect and the proximity effect <b>A.A. Moiseenko, S.M. Fyedorov</b> .....	87
Development of calibration modules for a complex of assessing the impact of electromagnetic interference on electronic devices <b>D.A. Pukhov, A.V. Suvorin, D.V. Vasil'chenko, M.A. Romashchenko</b> .....	95
Multipath antenna system of the VHF band based on a lens made of granite rubble <b>V.I. Nikolaev, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, S.M. Fyedorov</b> .....	100

**Mechanical engineering and science of machines**

Combined technologies for manufacturing parts in solid electrolytes <b>V.P. Smolentsev, A.A. Izvekov .....</b>	<b>107</b>
Analysis of technological possibilities of two-chamber impulse devices for sheet stamping <b>A.Yu. Botashev, A.A. Musaev.....</b>	<b>111</b>
Identification of the influence of the spatial orientation of the deposited layers, as well as their overlap coefficient on the surface shape error during additive shaping by an electric ARC <b>A.N. Grechukhin, V.V. Kuts, P.S. Shcherbakov.....</b>	<b>118</b>

## Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.6.001

УДК 621.039.566

### СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРОМ АЭС

М.Е. Ушков, В.Л. Бурковский

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается структура системы информационной поддержки процессов принятия решений оператором АЭС в оперативных условиях. Анализируются функциональные возможности системы информационной поддержки оператора (СИПО) на примере Нововоронежской атомной электростанции (НВ АЭС). Данная система дает возможность оператору, управляющему распределенным комплексом технологических объектов АЭС, проводить качественный анализ и обработку больших объемов сложноструктурированной информации и принимать своевременные адекватные решения в темпе реального времени. Кроме того, рассматривается объект управления и его структура, приводятся рекомендации, направленные на увеличение функциональных возможностей СИПО на базе искусственных нейронных сетей. Одной из многочисленных функций СИПО является прогнозирование состояния объекта управления на основе реализации программно-технологического комплекса модели энергоблока (ПТК МЭ). Однако существующая модель не способна учесть все факторы, влияющие на производственный процесс. Альтернативой здесь выступает искусственная нейронная сеть, которая в процессе обучения может сформировать искомые зависимости между большим числом параметров объекта управления и получить более полный и достоверный прогноз. Предложена структура искусственной нейронной сети на базе нечеткой системы вывода, которая реализует возможности нейронных сетей и нечеткой логики

**Ключевые слова:** система информационной поддержки оператора, искусственные нейронные сети на базе нечеткой системы вывода, прогнозирование, безопасность, функциональные возможности

#### Введение

В соответствии с «Общими положениями обеспечения безопасности атомных станций» НП-001-15 к системе информационной поддержки оператора (СИПО) предъявляются требования, согласно которым персонал блочного пункта управления должен быть обеспечен обобщенной информацией о параметрах АЭС, характеризующих состояние функций безопасности [1]. Однако СИПО может предоставить большие функциональные возможности, в том числе по обеспечению операторов необходимой информацией для качественного и безопасного управления технологическим процессом (ТП). СИПО осуществляет анализ информации для последующего предоставления операторам. В рамках анализа существует возможность прогнозирования состояния технологического процесса. Функция прогнозирования способствует поиску наиболее оптимального решения по управлению энергоблоком.

#### Технологический объект управления

Технологическим объектом управления является энергоблок НВ АЭС мощностью 1200

МВт, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) позволяет создать связь на основе технических и программных средств между различными объектами, участвующими в технологическом процессе.

АСУ ТП выполняет функции:

- автоматизированного управления объектами;
- контроля условий протекания ТП;
- автоматического поддержания параметров ТП;
- определения состояния технологических объектов управления;
- предоставления информации операторам при любом состоянии технологического процесса.

Автоматизированная система управления технологическим процессом территориально разделена в зависимости от функциональных особенностей объектов, входящих в её состав. АСУ ТП получает и преобразует примерно 8000 сигналов [2].

Автоматизация технологических объектов АЭС подразумевает наличие квалифицированных специалистов, которые будут обеспечивать качество и безопасность протекания технологического процесса. При этом в процессе принятия решений

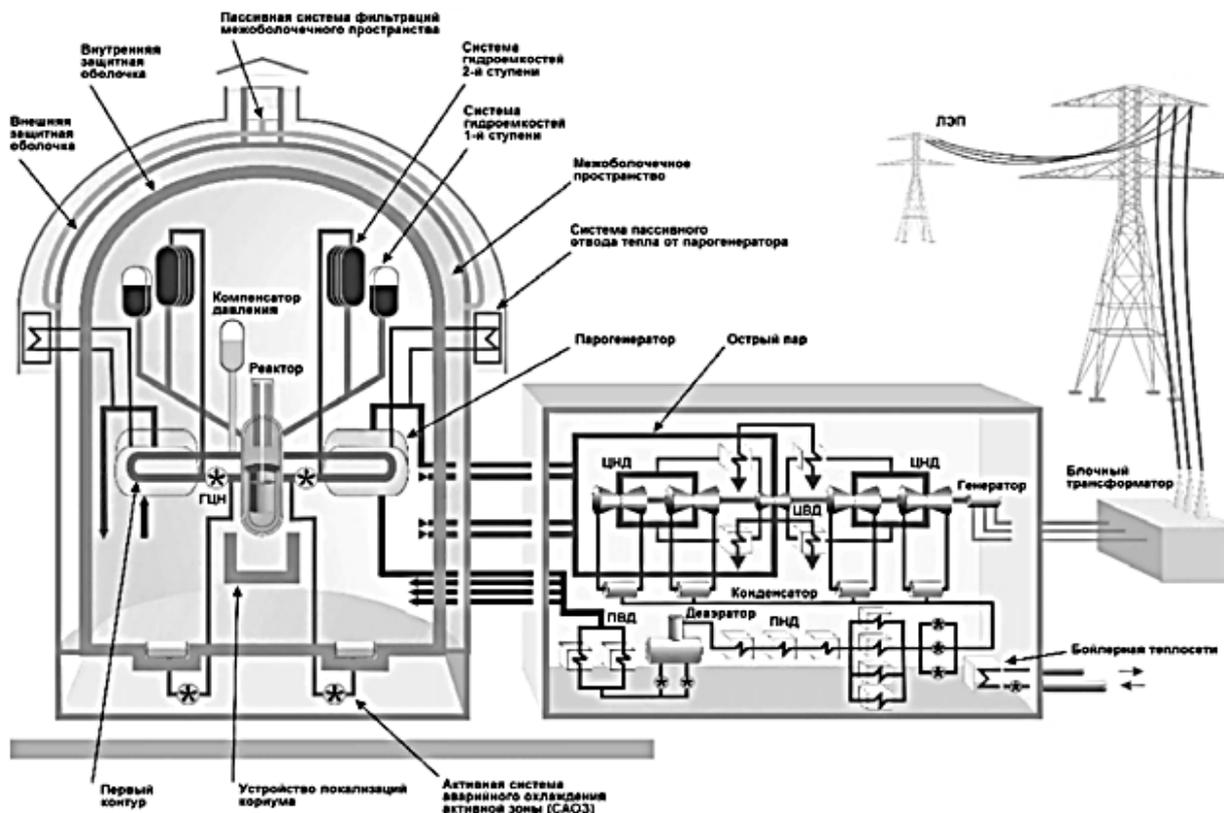


Рис. 1. Функциональная схема объекта управления

по выбору команды управления не исключены ошибки, обусловленные человеческим фактором.

Неправильные решения могут обуславливаться:

- большим потоком информации, который вызывает трудности в его анализе даже у специально подготовленного персонала;
- различным психоэмоциональным состоянием персонала, вызванным или нештатной ситуацией (стресс), или рутинной работой (потеря концентрации).

Таким образом, существует необходимость внедрения СИПО во всех режимах эксплуатации. Цель создания СИПО заключается в увеличении эффективности и безопасности управления технологическим процессом. Система уменьшит нагрузку на персонал, осуществляющий управление энергоблоком.

### Проблематика функции прогнозирования СИПО

СИПО должна обеспечивать персонал блочного пункта управления важными данными, которые требуются для управления технологическим процессом, при этом уменьшая информационный поток, обрабатываемый человеком.

СИПО должна быть способна предоставлять информацию в режимах нормальной экс-

плуатации, в режимах нарушения нормальной эксплуатации, в режимах проектных и запроектных аварий.

СИПО должна обеспечивать предоставление следующих функций:

- обеспечения информирования оператора о состоянии энергоблока путем представления структурированной, оптимизированной и детализированной информации;
- анализа работы технологического оборудования, формирования сигнализации и представления обработанной информации о возникновении разного вида отклонений в работе при эксплуатации с отклонениями;
- определения состояния объектов технологического процесса;
- прогнозирования технологического процесса, предоставления персоналу предложений по оптимальному управлению ТП;
- определения параметров, которые не соответствуют требуемым нормам, выявления причины несоответствия;
- своевременного определения и предоставления предложений по оптимальному способу устранения или уменьшения влияния параметра с выявленным несоответствием на ТП;
- исследования функционирования технологических защит и блокировок;

– наблюдения за операциями, которые выполняет персонал в рамках управления технологическим процессом для предотвращения совершения ошибочных действий;

– оказания помощи персоналу при проведении регламентированных работ [3].

Обобщенная структура СИПО приведена на рис. 3. Данные в СИПО поступают от системы верхнего блочного уровня (СВБУ).

В основу СИПО заложена программная модель энергоблока. Особое внимание стоит уделить функции прогнозирования на базе модели энергоблока, которая должна включать:

– модель нейтронно-физических процессов в активной зоне;

– модель теплогидравлических процессов первого и второго контура энергоблока активной зоны;

– модель электрогенератора и основного электрооборудования энергоблока;

– модели системы контроля и управления.

Модель должна предоставлять возможность исследования процессов при различных режимах эксплуатации.

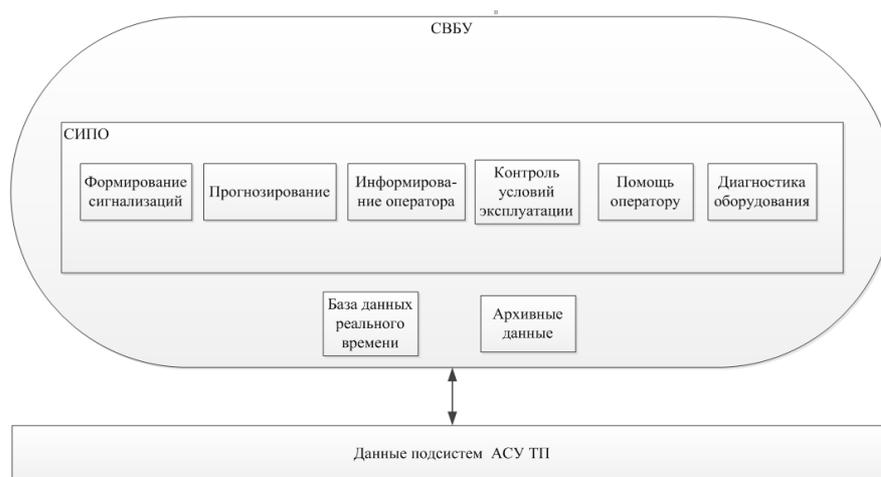


Рис. 2. Обобщенная структура системы информационной поддержки оператора АЭС

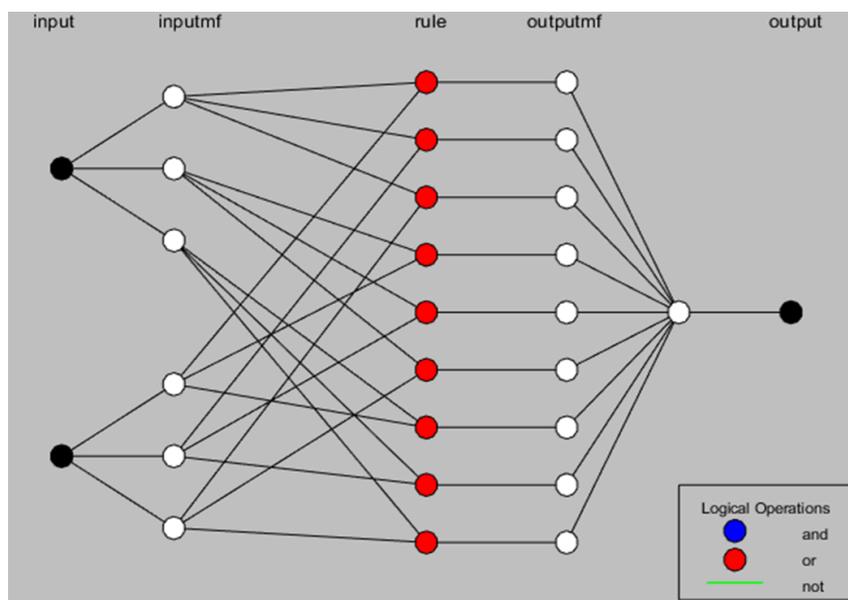


Рис. 3. Структура нейронной сети на базе нечёткой системы вывода

В качестве начальных данных модель энергоблока использует данные, поступающие из АСУ ТП. После обработки начальных данных СИПО предоставляет следующую информацию:

– прогноз изменения состояния ТП, команды управления от персонала при этом не учитываются в течение времени, определяемого глубиной прогноза, которая может составлять от 15 до 30 минут;

– прогноз изменения состояния ТП, при этом учитываются планируемые действия персонала по управлению технологическими объектами.

Описание управляющих воздействий постепенно обновляется в зависимости от текущего этапа вычислений. Для типовой цепочки действий существует возможность применить предварительно разработанный план [4].

Данные, полученные в процессе прогнозирования, должны проверяться на соответствие допустимым значениям. В случае нарушений допустимых значений оператор заметит сигнализацию. Данные, полученные в результате прогноза, могут быть представлены в виде графиков, таблиц, схем.

Функция прогнозирования системы информационной поддержки оператора не может охватить все процессы на производстве. Это обусловлено рядом причин:

– большое количество сценариев протекания технологического процесса, обусловленное различными режимами работы энергоблока;

– программная модель энергоблока не включает всё технологическое оборудование, задействованное на атомной электростанции;

– в модели не используются все технологические параметры, которые учитываются при управлении АЭС.

Увеличение точности прогнозов, а также увеличение количества прогнозируемых процессов объекта управления с большим числом измеряемых параметров и рядом внешних воздействующих факторов, формализованное описание которых отсутствует, является сложной задачей. Однако применение нейронных сетей наряду с программной моделью энергоблока в целях прогнозирования способно приблизить решение этой задачи. Программная модель энергоблока способна предоставить большое количество данных для качественного обучения нейронной сети. В свою очередь, нейронная сеть способна выявить зависимости между входными данными и предоставить результат прогнозирования.

### **Применение нейронной сети на базе нечёткой системы вывода в качестве инструмента для прогнозирования**

Применение нейронной сети на базе нечёткой системы вывода обеспечит следующие преимущества:

– возможность учёта при прогнозировании параметров, которые отсутствуют в программной модели энергоблока;

– возможность прогнозирования процессов, программное описание которых отсутствует;

– возможность автоматической настройки параметров нейронной сети.

В качестве входных данных для прогнозирования будут использоваться параметры основного технологического оборудования энергоблока, при необходимости также могут использоваться параметры всего оборудования и процессов, измерение которых осуществляется на АЭС.

На выходе нейронной сети формируется прогноз протекания требуемого технологического процесса.

Для каждого конкретного технологического процесса необходима индивидуальная настройка слоев и правил обработки входных данных, однако принципиально структуры нейронных сетей будут сходны друг с другом. При этом имеется возможность автоматического определения правил при обучении. Возможная структура нейронной сети на базе нечёткой системы вывода с двумя входными наборами данных изображена на рис. 3. Структура определяется в процессе обучения.

Нейронная сеть определяет зависимости между данными в процессе обучения. Благодаря различным методам обучения нейронной сети имеется возможность с достаточной точностью прогнозировать протекание технологического процесса. Одна из главных задач при обучении состоит в сборе данных для обучения, а также их подготовка и нормализация. Для решения этой задачи можно использовать как архивные данные системы верхнего блочного уровня, так и данные, полученные от программной модели энергоблока. Достоинством обучения нейронной сети с использованием модели является возможность получения данных в различных режимах эксплуатации АЭС.

### **Заключение**

В данной статье показана роль нейронных сетей при прогнозировании состояния технологического процесса энергоблока в целях увеличения точности прогнозов, а также количества прогнозируемых процессов. Сформулировано предложение об используемой архитектуре нейронной сети, рассмотрены её преимущества.

### **Литература**

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-15: утверждены

приказом Ростехнадзора от 17 декабря 2015 г. № 522. С. 27.

2. Головной блок нового поколения – особенности проекта ВВЭР-1200/ В.Г. Асмолов, И.Н. Гусев, В.Р. Казанский, В.П. Поваров, Д.Б. Стацера // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 5-21.

3. Использование результатов пусконаладочных работ для создания, настройки и валидации системы интеллектуальной поддержки оператора на блоке № 1 Новово-

ронежской АЭС-2/ И.Н. Гусев, Б.Л. Соловьев, В.П. Поваров, А.С. Кужиль, С.П. Падун // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 45-54.

4. Использование программной модели блока для совершенствования проектных решений и оптимизации управления технологическим процессом / Д.Б. Стацера, М.Ю. Тучков, П.В. Поваров, А.И. Тихонов, С.П. Падун, А.П. Воробьев, М.М. Майорова // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2020. № 4. С. 37-49.

Поступила 08.11.2021; принята к публикации 15.12.2021

#### Информация об авторах

**Ушков Максим Евгеньевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ushkov.maksim@mail.ru

**Бурковский Виктор Леонидович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvl@vorstu.ru

## STRUCTURE OF THE DECISION SUPPORT INFORMATION SYSTEM BY THE NPP OPERATOR

M.E. Ushkov, V.L. Burkovskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** we considered the structure of the information support system for decision-making by the NPP operator in operational conditions. We analyzed the functional capabilities of the operator information support system (SIPO) using the example of the Novovoronezh nuclear power plant (NV NPP). This system provides the operator managing the distributed complex of NPP technological facilities to carry out high-quality analysis and processing of large volumes of complex structured information and make timely adequate decisions in real time. In addition, we considered the control object and its structure and made recommendations aimed at increasing the functionality of the SIPO based on artificial neural networks. One of the many functions of the SIPO is to predict the state of the control object based on the implementation of the software and technological complex of the power unit model. However, the existing model is not able to take into account all the factors influencing the production process. An alternative here is an artificial neural network, which in the learning process can form the required dependencies between a large number of parameters of the control object and get a more complete and reliable forecast. The proposed structure of an artificial neural network based on a fuzzy inference system, which implements the capabilities of neural networks and fuzzy logic

**Key words:** operator information support system, ANFIS, prognostication, safety, functionality

#### References

1. “Federal rules and regulations in the field of atomic energy use. General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants” (“Federal’nye normy i pravila v oblasti ispol’zovaniya atomnoy energii. Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsiy”) NP-001-15: approved by order of Rostekhnadzor dated December 17, 2015 no. 522, pp. 27.

2. Asmolv V.G., Gusev I.N., Kazanskiy V.R., Povarov V.P., Statsura D.B. “New generation first-of-the kind unit – VVER-1200 design features”, *News of Higher Educational Institutions. Nuclear Energy (Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika)*, 2017, no. 3, pp. 5-21.

3. Gusev I.N., Solov’yev B.L., Povarov V.P., Kuzhil’ A.S., Padun S.P. “Using pre-commissioning results to develop, adjust and validate the operator intelligent support system at unit no. 1 of Novovoronezh NPP II”, *News of Higher Educational Institutions. Nuclear Energy (Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika)*, 2017, no. 3, pp. 45-54.

4. Statsura D.B., Tuchkov M.Yu., Povarov P.V., Tikhonov A.I., Padun S.P., Vorob’yev A.P., Mayorova M.M. “Using the unit simulation model to improve design solutions and optimize process management”, *News of Higher Educational Institutions. Nuclear Energy (Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika)*, 2020, no. 4, pp. 37-49.

Submitted 08.11.2021; revised 15.12.2021

#### Information about the authors

**Maksim E. Ushkov**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ushkov.maksim@mail.ru

**Viktor L. Burkovskiy**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЕХМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ВЕБ-БРАУЗЕРЕ

К.Г. Резников<sup>1</sup>, С.Н. Медведев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлена реализация программного обеспечения для построения трехмерных поверхностей с использованием трассировки лучей, выполняемого в веб-браузере персонального компьютера или смартфона. Подход веб-приложений стал широко применяться в последние годы из-за развития сети Интернет. Современные веб-браузеры имеют достаточную вычислительную мощность для реализации сложных веб-приложений, а не ограничиваются только веб-сайтами. В процессе разработки были изучены различные методы построения поверхностей и методы визуализации, чтобы подобрать наиболее оптимальные для реализации веб-приложения. Были проанализированы и представлены базовые способы создания трехмерных поверхностей. Выделены ключевые различия каркасного и полигонального способа задания поверхности. Рассмотрен ряд моделей с процедурно вычисляемыми поверхностями. Подробно описан кинематический способ образования поверхностей, а также описан разработанный алгоритм для преобразования кинематических моделей в поверхность с использованием полигональной сетки. Подробно описан процесс визуализации и метод трассировки лучей. Продемонстрирован способ работы с видеочипом и распараллеливанию вычислений для оптимизации веб-приложения с помощью библиотеки GPU.js. Представлена структура веб-приложения с описанием главных каталогов проекта. Структура проекта основана на фреймворке Vue.js, благодаря чему функционал веб-приложения позволяет безгранично расширять. Для демонстрации работы веб-приложения представлен пример пошагового задания кинематической поверхности и визуализации на сцене с применением графических эффектов, таких как закраска и освещение, а также представлен пример с визуализацией множества объектов на сцене

**Ключевые слова:** трехмерное моделирование, визуализация поверхностей, кинематические модели, трассировка лучей, веб-приложение

### Введение

Визуализация трехмерной поверхности является важной составляющей процесса разработки любой трехмерной модели. Визуализация позволяет наглядно оценить модель и провести ее анализ.

Существует различное программное обеспечение для визуализации трехмерных поверхностей. Каждое имеет свои особенности, достоинства и недостатки. В основном, для использования программного обеспечения программу необходимо установить в долговременную память устройства. При установке программы необходимо учитывать системные требования, что значительно ограничивает ряд поддерживаемых устройств по различным характеристикам: оперативная память, операционная система, размер дискового пространства и т.д. Важно отметить, что при удовлетворении системных требований такой подход имеет максимальную производительность относительно альтернативных подходов на тех же вычислительных системах.

Вычислительная мощность устройств постоянно возрастает, что позволяет использовать новые технологии и подходы к проектированию программного обеспечения. В настоящее время набирает популярность подход веб-приложений. Веб-приложение – это программное обеспечение, которое не требует установки и не хранится во внутренней памяти вычислительного устройства, а загружается с удаленного сервера в оперативную память устройства и выполняется в браузере.

Далее будет рассмотрена реализация веб-приложения для построения трехмерных поверхностей. Данное веб-приложение является 3D-движком, что значительно расширяет функционал веб-приложения для визуализации, так как он позволяет не только визуализировать поверхность, но и редактировать модель в интерактивном режиме.

### Модель поверхности

В компьютерной графике выделяют два базовых способа для визуализации поверхности [1]:

- *каркасный*, где объект задается по вершинам и ребрам между ними;

- *полигональный*, где объект задается по полигонам.

Каркасный способ дает неверное представление о геометрии модели. Отрисовывая ребра поверх друг друга, сложно определить, какую визуальную форму имеет объект. Например, как показано на рис. 1, невозможно определить, какая грань находится ближе к наблюдателю без дополнительных данных. Для каркасной модели невозможно применять эффекты компьютерной графики, такие как закраска, освещение и т.д.

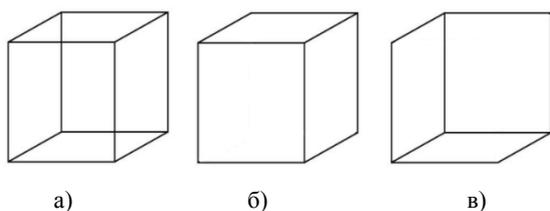


Рис. 1. а) каркасная модель куба; б), в) полигональная модель

Каркасные модели часто используют как вспомогательные для полигональных моделей. Например, для выделения ребер и вершин полигонов. Совокупность каркасной и полигональной моделей образует полигональную сетку. Полигональная сетка дает наиболее верное геометрическое представление о поверхности.

Полигональную сетку можно задать строго, указав координаты вершин и нормали плоскостей полигонов. Такой способ задания требует много времени для построения поверхности.

Существуют модели, для которых алгоритм построения ее поверхности вычисляется процедурно, такие как кинематические, сплайновые, Безье и другие. В таблице приведены некоторые достоинства и недостатки перечисленных моделей. В виду данной таблицы и особенностей модели остановимся подробнее на кинематических моделях, так как алгоритм построения кинематической поверхности прост в реализации, но требует много вычислительных мощностей.

Модель	Достоинства	Недостатки
Кинематическая модель	1. Вычисление точек и ребер при визуализации; 2. Вершины и ребра не хранятся в памяти	1. Сложность реализации; 2. Большое количество вычислений для составляющих модели.
Сплайновая модель	1. Вычисление промежуточных точек для повышения гладкости	1. Сложность реализации; 2. Большое количество вычислений
Безье	1. Вычисление промежуточных точек для повышения гладкости	1. Сложность реализации; 2. Большое количество вычислений

Кинематические модели образуют поверхность непрерывным движением в пространстве некоторой линии, называемой образующей, по определенной траектории, называемой направляющей [2]. Изображение кинематической модели представлено на рис. 2.

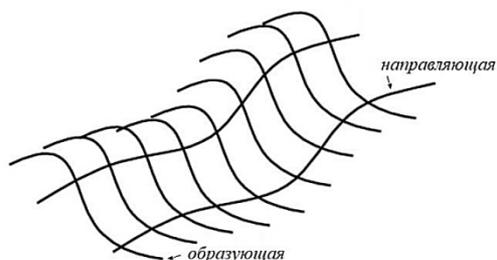


Рис. 2. Кинематическая поверхность

Рассмотрим параметрическое задание кинематической модели:

$$p(t, \tau) = p_0(\tau) A(t, \tau) + p_n(t), \quad (1)$$

$$t \in [t_0, t_n], \tau \in [\tau_0, \tau_m],$$

где  $p_0(\tau)$  – образующая линия с центром в начале координат;  $p_n(t)$  – направляющая линия, вдоль которой переносится центр образующей;  $A(t, \tau)$  – матрица преобразования;  $t \in [t_0, t_n], \tau \in [\tau_0, \tau_m]$  – интервалы изменения параметров.

При задании образующей и направляющей важно учитывать ограничения вычислительной системы, так как в некоторых случаях могут возникать вычислительные проблемы. Например, функции могут быть сложновычислимыми или функции невозможно задать без применения дополнительных алгоритмов. Одним из способов избежать подобные проблемы

является использование методов приближения функций [3]. Например, можно использовать сплайны или интерполяционные многочлены Ньютона.

Таким образом, образующую и направляющую можно задавать по точкам в пространстве и с помощью методов приближения получать непрерывную кривую. Для создания более точной кривой достаточно добавить дополнительные промежуточные узловые точки.

Уравнение кинематической поверхности позволяет вычислять конкретные точки поверхности, но для программной реализации необходимо получить набор полигонов для визуализации поверхности.

Рассмотрим алгоритм получения полигональной сетки поверхности кинематической модели.

**Алгоритм 1.** Построение полигональной сетки поверхности кинематической модели.

1. Зададим количество точек для образующей ( $k_m$ ) и направляющей ( $k_n$ ) для ограничения количества вершин полигональной сетки и получения определенной гладкости кинематической поверхности.

2. Вычислим шаг  $h_m = \frac{p_o(\tau_0) - p_o(\tau_m)}{k_m - 1}$  и набор точек  $p_{o,i} = p_o(\tau_0 + ih_m), i \in 1, 2, \dots, k_m$  для образующей  $p_o$ . Отметим, что рассматривается случай  $p_o(\tau_0) \neq p_o(\tau_m)$  для незамкнутой кривой. За длину кривой принимается расстояние между первой и последней точкой в наборе. Таким образом, можно избежать дополнительных вычислений на расчет приближенной длины кривой. Дополнительно вычислим шаг  $h_n$  и набор точек  $p_{n,j}$  для направляющей, подставив соответствующие значения.

3. Преобразуем полученный набор точек в матрицу координат, приняв за  $z$  координату значение 0

$$P_o = \begin{pmatrix} (p_{o,1})_x & \dots & (p_{o,k_m})_x \\ (p_{o,1})_y & \dots & (p_{o,k_m})_y \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

4. Чтобы расположить поверхность в определенной позиции в пространстве, зададим координаты точки начального положения  $q_0$  и вектор направления поверхности  $\bar{v}_0$ .

5. Набор точек образующей в пространстве переместим так, чтобы первая точка набора перешла в начальное положение кинематической поверхности  $q_0$ . Для этого применим аффинное преобразование перемещения  $A_T(q_{0,x}, q_{0,y}, q_{0,z})$  к  $P_o$

$$P_o = A_T(q_{0,x}, q_{0,y}, q_{0,z})P_o. \quad (3)$$

6. Сопоставим вектор направления поверхности  $\bar{v}_0$  с направляющей кинематической поверхности. Введем аффинное преобразование сопоставления вектора начального положения  $\bar{v}_0$  с вектором направления  $\overrightarrow{p_n(t_0), p_n(t_0 + h_n)}$ , где  $h_n = \frac{p_n(t_0) - p_n(t_n)}{k_n - 1}$  и применим к  $P_o$ . Получим

$$P_o = A_S(v_0, \overrightarrow{p_n(t_0), p_n(t_0 + h_n)})P_o \quad (4)$$

7. Вычислим матрицу аффинного преобразования следующей итерации  $j \in 1, 2, \dots, k_n$ . Применим матрицу аффинного перемещения из точки  $p_n(t_j)$  в  $p_n(t_j + h_n)$  к матрице аффинного преобразования кинематической поверхности и к матрице точек  $P_o$ . В итоге получим

$$\dot{P}_o = A_T(p_n(t_j), p_n(t_j + h_n))A(i, j)P_o. \quad (5)$$

8. Преобразуем матрицы  $\dot{P}_o$  и  $P_o$  в наборы точек  $(p_{o,1}, p_{o,2}, \dots, p_{o,m})$  и  $(p_{o,1}, p_{o,2}, \dots, p_{o,m})$  соответственно.

9. Для каждого индекса  $i \in (1, 2, \dots, m - 1)$  составим набор точек, где каждый такой набор представляет собой вершины четырехугольного полигона

$$p_{o,i}, p_{o,i+1}, p_{o,i+1}, p_{o,i} \quad (6)$$

10. Список полученных наборов добавим в общий список полигонов.

11. Заменяем матрицу  $P_o$  на  $\dot{P}_o$  и повторим заново шаги 7-10. Закончить алгоритм на шаге  $j = k_n - 1$ .

Таким образом, для всех преобразований в соответствии отрезкам  $[\tau_m, \tau_{m-1}]$  для образующей и отрезкам  $[t_n, t_{n-1}]$  для направляющей будет получен список из наборов по четыре точки, где каждый набор будет представлен как четырехугольный полигон.

Визуально данный алгоритм представлен на рис. 3.

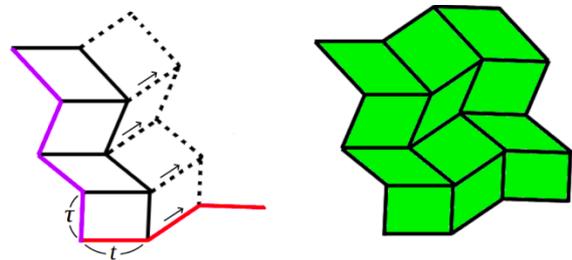


Рис. 3. Вычисление полигональной сетки

Получив набор полигонов, необходимо визуализировать его с помощью метода визуализации.

Визуализация моделей – это процесс получения изображения модели. Такой процесс может быть реализован различными алгоритмами, в зависимости от целей визуализации, а

также от дополнительных факторов или эффектов, влияющих на модель: закраска, освещение, тени и т.д. Кроме того, чтобы изображение модели было корректным и однозначным, необходимо использовать алгоритмы удаления невидимых граней и наложения.

Рассмотрев ряд наиболее используемых методов визуализации [1], для реализации был выбран метод трассировки лучей.

### Метод трассировки лучей

Суть метода трассировки лучей сводится к вычислению для каждого пикселя максимально близкого для наблюдателя полигона. Визуально алгоритм представлен на рис. 4, где

$i$  – точка наблюдателя в пространстве;

$P$  – проекция изображения на экран, видимая наблюдателю;

$r$  – точка пикселя изображения на проекции;

$j$  – ближайшая к наблюдателю точка пересечения луча с множеством полигонов.

Точка наблюдателя  $i$  и полученная точка  $r$  образуют луч, который пересекает множество полигонов. Из всех пересечений выбирается полигон с наименьшим расстоянием от наблюдателя. Таким образом, для каждого пикселя вычисляется яркость.

Метод трассировки лучей позволяет визуализировать модели любой сложности, так как для него не нужно проверять пересечение полигонов между собой. Кроме того, для него есть возможность применения любых визуальных эффектов.

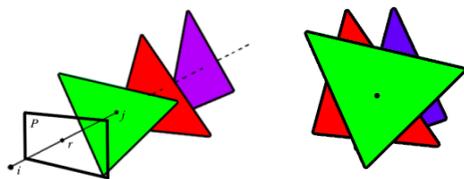


Рис. 4. Схема алгоритма трассировки лучей

Для метода трассировки лучей можно выделить следующие преимущества:

1. Низкая сложность реализации;
2. Малая требуемая память;
3. Возможность закраски моделей;
4. Возможность освещения моделей;
5. Удаление невидимых граней.

Единственным и значительным его недостатком является большое количество вычислений, но производительность современных вычислительных устройств позволяет реализовать данный метод для работы в реальном времени.

Далее перейдем к программной реализации и рассмотрим структуру, интерфейс и функционал веб-приложения.

### Реализация веб-приложений

Веб-приложение – это программное обеспечение, которое выполняется в браузере, с предварительной загрузкой исходного кода с сервера. После загрузки исходный код интерпретируется и полностью загружается в оперативную память. Веб-приложения разрабатываются на языке программирования JavaScript [4], поддерживаемом всеми современными браузерами. Это позволяет запускать веб-приложения на любых вычислительных устройствах с установленным браузером, таких как персональный компьютер, смартфон, планшет и др., независимо от используемой операционной системы.

При разработке веб-приложения необходимо учитывать ограничения веб-браузеров и вычислительную мощность устройств. Для этого важно спроектировать правильную структуру исходного кода веб-приложения. Для организации структуры проекта веб-приложения и ускорения разработки используются различные фреймворки [5]. В рассматриваемом веб-приложении используется фреймворк Vue.js [6]. Данный фреймворк помогает создать многофункциональное приложение и дает возможность постоянно расширять и поддерживать проект.

Для повышения производительности веб-приложения исходный код необходимо оптимизировать. При использовании метода трассировки лучей для визуализации поверхностей вычислительной мощности центрального процессора может быть недостаточно. Для решения этой проблемы будем использовать процессорную мощность видеокарты, так как большинство современных браузеров имеет внутренний API (анг. application programming interface – программный интерфейс приложения) для работы с видеочипом.

Далее рассмотрим структуру исходного кода.

### Структура исходного кода

Корневая структура проекта веб-приложения основана на паттерне Vue-приложения. Главным каталогом исходного кода является *src*. Каталог *src* содержит следующие каталоги:

- *components* – каталог компонентов Vue-приложения;
- *functions* – каталог переиспользуемых функций;
- *math* – каталог классов для математической логики;
- *models* – каталог классов моделей компьютерной графики;
- *router* – каталог маршрутизации Vue-приложения;
- *scene* – каталог классов для построения сцены;
- *store* – каталог модулей хранилища Vue-приложения;
- *App.vue* – файл корневого компонента Vue-приложения;
- *main.js* – файл точки сборки проекта.

Каждый каталог имеет вложенную структуру с разделением на более мелкие каталоги для удобства разработки и поддержки стиля исходного кода.

Не будем подробно останавливаться на каждом каталоге и его содержимом, а рассмотрим наиболее важную часть проекта – реализация метода трассировки лучей.

### Реализация трассировки лучей

Быстродействие веб-приложения и возможность отрисовки сцены в реальном времени с дополнительными эффектами стало возможно благодаря интерфейсу API видеокарты для браузеров. Технология, предоставляющая API видеокарты, называется WebGL. Для взаимодействия Vue-приложения с API видеокарты используется библиотека GPU.js, которая ускоряет процесс разработки и поддерживает автоматическое распараллеливание. Библиотека GPU.js использует WebGL и автоматически транслируют исходный код обработчика в язык шейдеров.

При написании кода, транслируемого библиотекой GPU.js, важно учитывать, что нельзя использовать специализированные функции языка, так как язык шейдеров их не поддерживает. Для примера далее приведен фрагмент транслируемого кода в язык шейдеров.

```
const dA = LengthFPTP(point0,point1);
const dCross0 = LengthFPTP(crossPoint, point0);
const dCross1 = LengthFPTP(crossPoint, point1);
const hA = HeightToSegment(dA, dCross0, dCross1);
if (hA < sizeOfPixel) { isBorder = true; }
else {
    const dB = LengthFPTP(point1, point2);
    const dCross2 = LengthFPTP(crossPoint, point2);
    const hB = HeightToSegment(dB, dCross1, dCross2);
    if (hB < sizeOfPixel) { isBorder = true; }
    else {
```

```
const dC = LengthFPTP(point2, point0);
const hC = HeightToSegment(dC, dCross0,dCross2);
if (hC < sizeOfPixel) { isBorder = true; }
}
}
```

Представленный фрагмент отвечает за вычисление точки пересечения луча с плоскостью полигона и определения принадлежности точки к полигону либо его границе. Код содержит только базовые функции языка JavaScript, которые также предоставляет язык шейдеров. Функции *LengthFPTP* и *HeightToSegment* объявлены вручную и зарегистрированы в ядре GPU.js. Функции, объявленные вручную, также не должны содержать специализированных функций, как и весь транслируемый код для GPU.js.

Перейдем к разбору самой важной функции веб-приложения.

### Алгоритм рендер-функции

Алгоритм рендер-функции является самой важной частью веб-приложения. Рендер-функция отвечает за вычисление и вывод изображения сцены. Вызов этой функции происходит при изменении параметров камеры, сцены, объектов сцены, а также при каждом обновлении кадра анимации. Рассмотрим этапы выполнения алгоритма рендер-функции.

#### Алгоритм 2. Алгоритм рендер-функции.

1. Обнуляются динамические параметры сцены, такие как список полигонов и источников света, а также производится очистка холста (закрашивание области изображения цветом по умолчанию).

2. Производятся предварительные вычисления параметров объектов сцены. Алгоритм проходит по списку объектов моделей сцены и вызывает для каждого объекта рендер-метод (метод отрисовки).

2.1. Предварительно в рендер-функции, определяются параметры для анимации, если они предусмотрены для конкретного типа модели. Далее на основе камеры и параметров анимации к модели применяются преобразования.

2.2. После всех преобразований вычисляется поверхность модели по алгоритму 1, и все полигоны добавляются в общий список.

3. Создается ядро GPU.js библиотеки со статическими параметрами камеры и сцены, такими как разрешение изображения, размер пикселя и функция обратного вызова для каждого пикселя изображения. Функция обратного вызова включает в себя реализацию алгоритма трассировки лучей.

4. После создания ядра запускается выполнение библиотеки GPU.js. Для каждого пикселя вычисления происходят в отдельном потоке. По завершению выполнения всех потоков ядро GPU.js сообщает о статусе выполнения.

5. При получении успешного статуса станет доступен массив пикселей, который транслируется на холст для получения изображения.

При активном режиме анимации, рендер-функция будет запущена снова через вычисленный интервал времени. Изменение параметров сцены и объектов будет изменять соответственно изображение в реальном времени.

Если отключен метод трассировки лучей или сцена является двумерной, то происходит сразу отрисовка сцены на холст. Например, для объектов типа список точек или сплайн.

Важно отметить, что для каждого типа модели определена собственная рендер-функция. Аргументом рендер-функции является камера, чтобы для каждой модели можно было получить доступ к методам камеры.

Веб-приложение имеет также множество других методов и функций, имеющих сложную и многоуровневую логику для работы с моделями, камерой, сценой и другими модулями веб-приложения.

Перейдем к рассмотрению интерфейса веб-приложения.

### Пример работы веб-приложения

Воспользуемся итоговым веб-приложением [7] и рассмотрим процесс создания кинематической поверхности с добавлением эффекта освещения.

Откроем веб-приложение, переключив режим в двумерную сцену. Создадим несколько объектов с типом набор точек, как показано на рис. 5. Для повышения гладкости поверхности воспользуемся дополнительным функционалом и создадим кривые, основанные на созданных наборах точек.

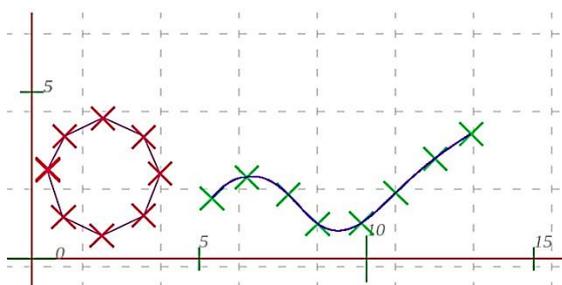


Рис. 5. Наборы точек и приближенные функции

Далее перейдем в трехмерную сцену и создадим объект кинематической модели, выбрав образующую и направляющую из созданных кривых. Построенная поверхность имеет стандартную закрашку черным цветом.

И наконец, добавим источник света и установим в параметрах цвет затемнения и освещения объекта. На рис. 6 слева представлена поверхность без освещения и справа с освещением для одной и той же модели.

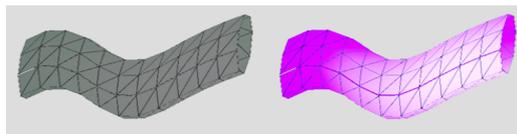


Рис. 6. Кинематическая модель без освещения и с освещением

Сцена не ограничивает количество отображаемых объектов. Дополнительный пример работы веб-приложения с несколькими объектами представлен на рис. 7.

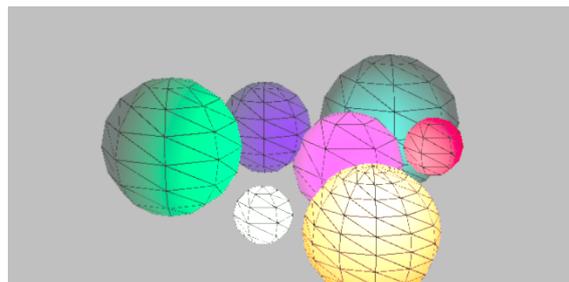


Рис. 7. Пример с множеством объектов на сцене

На сцене размещены несколько сфер с различным цветом закрашки. Как можно заметить, источник света помещен внутри центральной желтой сферы для добавления эффекта освещения всей сцене.

### Заключение

Таким образом, в данной статье рассмотрены и проанализированы различные способы задания поверхностей. Разработан алгоритм построения полигональной сетки поверхности кинематической модели. Рассмотрены особенности и представлены технологии разработки сложновычислительных веб-приложений. Описан метод трассировки лучей и его ключевые отличия от других методов визуализации. Описана структура веб-приложения, взаимодействие веб-браузера с API видеочипа через библиотеку GPU.js и ключевые функции веб-приложения. Описан алгоритм рендер-функции веб-приложения.

### Литература

1. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. М.: Мир, 1989. 512 с.
2. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.
3. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: учеб. пособие. СПб.: Физмалит, 2002. 630 с.
4. Браун Э. Изучаем JavaScript. Руководство по

созданию современных веб-сайтов. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: ООО «Альфа-книга», 2017. 368 с.

5. Современный учебник JavaScript. Введение. URL: <https://learn.javascript.ru/intro> (дата обращения: 30.09.2021)

6. Введение – Vue.js. URL: <https://ru.vuejs.org/v2/guide/> (дата обращения: 30.09.2021)

7. GitHub – reznikovkg/nm-vue. URL: <https://github.com/reznikovkg/nm-vue> (дата обращения: 30.09.2021)

Поступила 06.11.2021; принята к публикации 15.12.2021

### Информация об авторах

**Резников Константин Георгиевич** – аспирант кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [rkg@reznikovk.ru](mailto:rkg@reznikovk.ru), тел. +7 (951) 564-36-44

**Медведев Сергей Николаевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры вычислительной математики и прикладных информационных технологий, Воронежский государственный университет (394036, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1), e-mail: [s\\_n\\_medvedev@mail.ru](mailto:s_n_medvedev@mail.ru), тел. +7 (906) 671-62-05

## SOFTWARE DEVELOPMENT FOR RENDERING THREE-DIMENSIONAL SURFACES IN A WEB BROWSER

K.G. Reznikov<sup>1</sup>, S.N. Medvedev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article presents the implementation of software for rendering 3D-surfaces using ray tracing, running in a web browser of computers or smartphones. The web application approach has become widespread in recent years due to the development of the Internet. Modern web browsers have enough processing power to run complex web applications and are not limited to just websites. During the development process, various methods for constructing surfaces and visualization methods were analyzed to choose the most optimal solution for web applications. We analyzed and presented basic methods of creating 3D surfaces. We highlighted the key differences between wireframe and polygonal methods of surface definition. We considered several models with dynamic surface computation. We described the kinematic method of surface formation in detail and the developed algorithm for transforming kinematic models into a surface using a polygonal mesh. We described in detail the rendering process and ray tracing method. We demonstrated a way of working with a video chip and parallelizing computations to optimize a web application using the GPU.js library. We presented the structure of a web application with a description of the main project directories. The project structure is based on the Vue.js framework. The framework allows one to endlessly expand the functionality of a web application. The article presents how the web application works and example of step-by-step creation of a kinematic surface and rendering on a scene using graphic effects such as shading and lighting. Also it contains an example of rendering many objects on a scene

**Key words:** 3D-modeling, rendering on surfaces, kinematic models, ray tracing, web application

### References

1. Rogers D. “Algorithmic foundations of computer graphics” (“Algoritmicheskie osnovy mashinnoy grafiki”), Moscow: Mir, 1989, 512 p.
2. Nikulin E.A. “Computing Geometry and Algorithms” (“Computernaya geometriya i algoritmy”), Saint Petersburg: BHW-Petersburg, 2003, 560 p.
3. Bakhvalov N. S. “Number methods” (“Chislennyye metody”), textbook, Saint Petersburg: Fizmalit, 2002, 630 p.
4. Brawn E. “Learn JavaScript. Tutorial for making modern websites” (“Izuchaem JavaScript. Rucovodstvo po sozdaniyu sovremennyh saitov”), Saint Petersburg: Alpha-book, 2017, 368 p.
5. Modern tutorial JavaScript. Introduction, available at: <https://learn.javascript.ru/intro> (date of access: 30.09.2021)
6. Introduction – Vue.js, available at: <https://ru.vuejs.org/v2/guide/> (date of access: 30.09.2021)
7. GitHub – reznikovkg/nm-vue, available at: <https://github.com/reznikovkg/nm-vue> (date of access: 30.09.2021)

Submitted 06.11.2021; revised 15.12.2021

### Information about the authors

**Konstantin G. Reznikov**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [rkg@reznikovk.ru](mailto:rkg@reznikovk.ru), tel. +7 (951) 564-36-44

**Sergey N. Medvedev**, Cand. Sc. (Physics-Mathematics), Associate Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [s\\_n\\_medvedev@mail.ru](mailto:s_n_medvedev@mail.ru), tel. +7 (906) 671-62-05

**РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫМ БЛОКОМ НА НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС**Д.С. Синюков<sup>1</sup>, А.Д. Данилов<sup>2</sup>, А.А. Самодеенко<sup>1</sup>, А.А. Иванников<sup>1</sup><sup>1</sup>Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Россия<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** ядерные блоки атомных электростанций имеют длительный срок эксплуатации, что приводит к ситуации, когда в процессе эксплуатации технические и программные средства систем управления перестают отвечать текущим современным требованиям в плане надежности и безопасности их использования. В результате для продления срока действия ядерного блока требуется обязательное проведение модернизации информационно-вычислительной системы (ИВС) управления. Приводятся результаты такой работы, проведенной на 4 блоке Нововоронежской АЭС. При выборе оборудования для создания новой ИВС модернизируемого энергоблока был реализован принцип унификации. Программное обеспечение всех компонентов программно-технического комплекса ИВС, включая функции систем предоставления параметров безопасности и внутриреакторного контроля, реализовано на единых программных средствах. Представленные значения параметров сигналов на всех рабочих станциях программно-технического комплекса информационной системы, интерфейсы взаимодействия, человеко-машинный интерфейс и навигация по видеокдрам идентичны, что учитывает требования по оптимальному взаимодействию системы «человек-машина». Система удовлетворяет требованиям по обеспечению надёжности на основе резервирования, независимости, разнообразия, с учётом отказов по общей причине. Для этого ИВС была реализована в виде двухканальной информационной системы. Основной и дублирующий каналы измерения и обработки данных в программно-техническом комплексе ИВС функционируют одновременно в полном объеме. Разработанная информационно-вычислительная система позволила продлить срок эксплуатации 4 энергоблока Нововоронежской АЭС на 15 лет

**Ключевые слова:** информационно-вычислительная система, клиент-серверная архитектура, контроль параметров, устройство сопряжения с объектом, архив данных

**Введение**

Ядерные блоки атомных электростанций имеют длительный срок эксплуатации, что приводит к ситуации, когда в процессе эксплуатации технические и программные средства систем управления перестают отвечать текущим современным требованиям в плане надежности и безопасности их использования. В результате для продления срока действия ядерного блока требуется обязательное проведение модернизации информационно-вычислительной системы (ИВС) управления.

В данной статье приводятся результаты такой работы, проведенной на 4 блоке Нововоронежской АЭС.

При этом потребовалось создать резервный щит управления (РЩУ), произвести разделение систем питания и систем контроля и управления технологических систем нормальной эксплуатации и систем безопасности. Кроме этого были сохранены традиционные способы управления и контроля: управление с по-

мощью индивидуальных ключей/кнопок, а также индивидуальные приборы и табло сигнализации, установленные на панелях и пультах блочного и резервного щитов управления (БЩУ/РЩУ). Плюс дополнительно был разработан компьютерный способ визуализации параметров на видеокдрах информационных систем.

**Характеристика информационно-вычислительной системы ядерного блока до модернизации**

На энергоблоке №4 Нововоронежской АЭС эксплуатировалось несколько разрозненных информационных систем, представляющих информацию о состоянии технологического оборудования эксплуатирующему персоналу БЩУ[1-4]. Например,

- система отображения технологической информации (СОТИ-М) на базе приборов Ш711/2-1;

- многоканальные приборы производства «Электроточприбор» для приема и обработки поочередно, а также выдачи до 4-х релейных каналов сигнализации по каждому параметру;

- программно-технический комплекс системы внутриреакторного контроля на базе аппаратуры СВРК-03-06 производства завода «Тензор», предназначенный для приёма и обработки сигналов от совокупности внутриреакторных датчиков, проведения теплогидравлических и нейтронно-физических расчётов для определения состояния активной зоны реактора и представления полученных данных оперативному персоналу БЦУ;

- система представления параметров безопасности на базе измерительных шкафов аппаратуры DAS и вычислительного уровня под управлением операционной системы OpenVMS, предназначенная для предоставления информации о состоянии технологических систем и расчёта состояния критических функций безопасности (КФБ) энергоблока.

Структурная схема информационно-вычислительной системы ядерного блока до модернизации представлена на рис. 1.

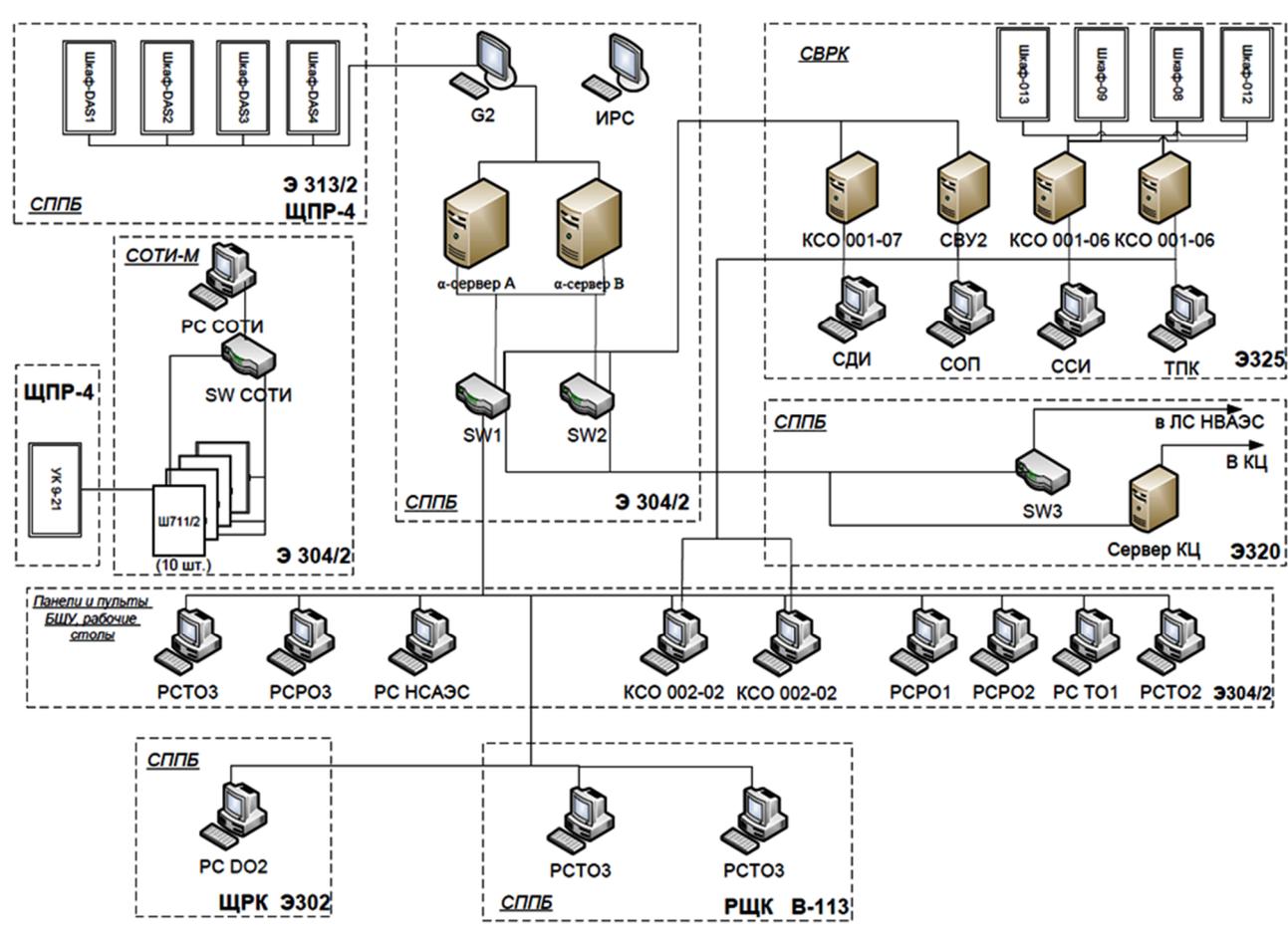


Рис. 1. Структурная схема информационно-вычислительной системы ядерного блока до модернизации: PC - рабочая станция, КСО - комплект специального оборудования, РО/ТО – реакторное/турбинное отделение, СВУ – сервер верхнего уровня, СДИ/СОП/ССИ – рабочая станция дежурного инженера/оперативного персонала/системного инженера

Недостатками построения и функционирования являются следующие моменты:

- системы СВРК и системы предоставления параметров безопасности (СППБ) имеют различные аппаратные и программные решения;

- в каждой системе предусмотрены собственные рабочие станции, работающие под управлением разного прикладного программного обеспечения и по разному реализовывающие подход к отображению информации опе-

ратору на видеокдрах, к работе с архивными данными и т.д.;

- СОТИ-М не имеет средств графического представления информации и архивных данных на БЦУ и использует мощности программного обеспечения СППБ;

- подсистемы АСУТП деинтегрированы и полностью автономны, не имеют общего информационного пространства.

К моменту продления срока эксплуатации энергоблока №4 вышеперечисленные системы безнадежно устарели и не отвечали современным требованиям, предъявляемым к современным средствам АСУ ТП [5].

### Принципы построения внедряемой ИВС

При выборе оборудования для создания новой ИВС модернизируемого энергоблока был реализован принцип унификации [6,7]. Программное обеспечение всех компонентов программно-технического комплекса (ПТК) ИВС, включая функции СППБ и СВРК, реализовано на единых программных средствах. Представление значений параметров сигналов на всех рабочих станциях ПТК ИВС, интерфейсы взаимодействия, человеко-машинный интерфейс и навигация по видеокдрам идентичны, что учитывает требования по оптимальному взаимодействию системы «человек-машина». На рис. 2 представлена принципиальная схема построения ИВС на энергоблоке №4 после модернизации.

Система удовлетворяет требованиям по обеспечению надёжности на основе резервирования, независимости, разнообразия, с учётом отказов по общей причине.

Для этого ИВС была реализована в виде двухканальной информационной системы [8,10]. Основной и дублирующий каналы измерения и обработки данных в ПТК ИВС функционируют одновременно в полном объеме. В серверах оперативного контура вычислительного комплекса ИВС, к которым относятся два сервера ИВС и два сервера СВРК, информация, полученная от двух каналов устройств связи с объектом: УСО ИВС и УСО СВРК обрабатывается совместно, что обеспечивает отсутствие влияния отказа в одном из каналов УСО на результаты работы ИВС.

### Функционал разработанной ИВС

Оборудование разработанной ИВС при режимах нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации модернизируемого блока реализует следующий *информационный функционал* [1, 2]:

- прием информации от всех существующих, модернизированных и вновь созданных подсистем систем контроля и управления (СКУ) энергоблока (ЭБ) в соответствии со структурной схемой ИВС (рис. 2);

– представление актуальной и ретроспективной информации оперативному персоналу, а также экспертам аварийных центров АЭС и Концерна Росэнергоатом;

– представление оперативному персоналу световой и звуковой сигнализации при выходе параметров за проектные уставки;

– регистрация (архивирование) полученной информации, включая команды операторов и положение механизмов систем безопасности;

– вывод на печать зарегистрированной информации в различной форме;

– обеспечение единым временем оборудования ПТК ИВС и смежных подсистем СКУ ЭБ нижнего уровня автоматизации, от которых вычислительный комплекс ИВС принимает информацию;

– регистрацию информации при аварийных ситуациях (СРВПЭ);

– обеспечение функционирования СВРК и СППБ в объеме не менее чем в эксплуатируемой системе до модернизации с учётом изменений в системах безопасности и системах нормальной эксплуатации.

*Функционал СВРК* по обеспечению персонала достоверной информацией о состоянии основных параметров активной зоны реактора (АкЗ) и теплоносителя первого контура включает в себя:

– обработку результатов измерений;

– расчёт тепловой мощности активной зоны;

– расчёт теплофизических переменных в объёме активной зоны;

– расчёт поля энерговыделения;

– расчёт запасов до кризиса теплообмена;

– расчёт функционалов по объёму АкЗ;

– расчёт выгорания и отравления в объёме АкЗ;

– расчёт покассетных и потвэльных распределений энерговыделения;

– расчёт коэффициентов внутрикассетной неравномерности энерговыделения;

– контроль отклонений технологических величин;

– компенсация запаздывания сигналов ДПЗ;

– учет влияния неполного перемешивания теплоносителя в головках кассет на показания термопреобразователя (ТП) на выходах кассет;

– контроль температуры (или энтальпии) теплоносителя на выходе из горячего канала.

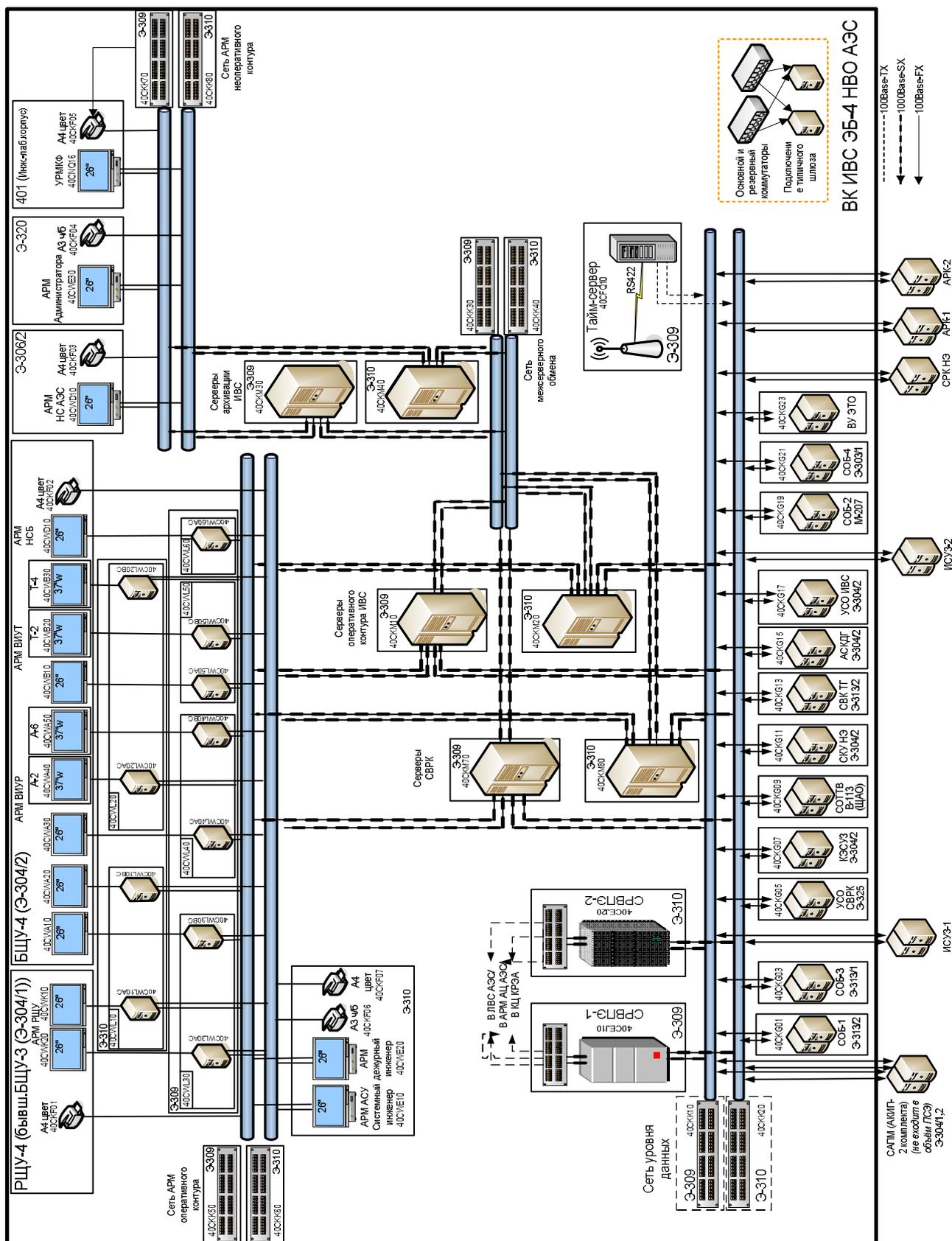


Рис. 2. Принципиальная схема информационно-вычислительной системы после модернизации энергоблока №4:  
 СОБ - система обеспечения безопасности, СВК – система контроля и управления, СВК – система контроля вибрации,  
 АСК – автоматизированная система контроля,  
 КЭСУЗ - комплект электрооборудования систем управления защитой

Дополнительно к последней функции реализованы следующие опции:

- а) компенсация запаздывания сигналов ДПЗ;
- б) учет влияния неполного перемешивания теплоносителя в головках кассет на показания ТП на выходах кассет;
- в) контроль температуры теплоносителя на выходе из горячего канала.

*Функционал СППБ* включает:

- своевременное уведомление оператора о нарушении КФБ, отображение сигнализации об изменениях состояния КФБ;
- представление оперативному персоналу электронного аналога деревьев состояния КФБ, определяющих выбор процедуры по восстановлению КФБ;
- выдача оператору рекомендаций о применении той или иной процедуры по восстановлению КФБ (контроль состояния диагностических блоков (узлов) деревьев КФБ и контроль активации выходных ветвей деревьев КФБ);
- предоставление электронных интерактивных процедур восстановления КФБ;
- предоставление справочной или расчетной информации, необходимой для принятия решений и выполнения управляющих действий, определенных в «Руководстве по управлению за проектными авариями»;
- предоставление необходимой информации о состоянии рабочих механизмов, используемых при выполнении управляющих действий.

#### **Автоматизированные рабочие места оперативного персонала**

Автоматизированные рабочие места (АРМ) оперативного персонала обеспечивают представление всей совокупной технологической информации оперативному персоналу блока и сигнализацию о нарушениях технологического процесса. АРМ получают информацию от каждого сервера ИВС, работают независимо друг от друга и представляют информацию на мониторах в цикле приема данных от серверов.

В состав ИВС входят следующие *автоматизированные рабочие места оперативного персонала*:

- АРМ ведущего инженера управления реактором (ВИУР), состоящий из двух дисплеев, размещенных на панелях, и трех дисплеев, размещенных на столе БЩУ;
- АРМ ведущего инженера управления турбиной (ВИУТ), состоящий из двух дисплеев, размещенных на панелях, и одного дисплея, размещенного на столе БЩУ;
- АРМ начальника смены блока (НСБ),

состоящий из одного дисплея, размещенного на столе БЩУ;

- АРМ РЩУ, состоящий из двух дисплеев, размещенных на РЩУ;
- АРМ начальника смены (НС) АЭС, состоящий из дисплея, размещенного на рабочем месте НС АЭС;
- АРМ системного администратора ИВС;
- АРМ системного инженера и АРМ дежурного инженера;
- УРМКФ (рабочее место контролирующего физика).

На мониторы оперативных АРМ выводятся следующие данные:

- технологическая информация (представление видеок кадров, сигнализация, протоколирование технологических событий, вывод архивных данных);
  - прогноз состояния РУ (с участием оперативного персонала).
- На мониторы неоперативных АРМ выводится информация:
- диагностика состояния измерительных каналов;
  - контроль и диагностика ПТК ИВС;
  - контроль санкций доступа персонала.

Реализация решения использовать однотипные аппаратные и программные средства шлюзового оборудования, входящего в состав ИВС модернизированного энергоблока, позволяет оптимизировать состав резервного оборудования и избежать программных конфликтов при обмене данными «шлюз-сервер». Шлюзовое прокладное программное обеспечение энергоблока предусматривает до 40 протоколов обмена со смежными системами.

На сегодня на данном энергоблоке создана сетевая инфраструктура для подключения до 24 предусмотренных проектом ИВС систем.

#### **Программное обеспечение разработанной ИВС**

В качестве базовой платформы для разработанной ИВС был выбран программный комплекс «Крузиз». ПО данного комплекса имеет модульную структуру и создается проектным путем (конфигурируется) на базе библиотеки программных средств «Крузиз». Сконфигурированное ПО является децентрализованным и может функционировать как на одном компьютере, так и на многомашинном комплексе. По решаемым задачам и степени инвариантности к прикладным задачам ПО было реализовано четыре уровня [8, 9].

*Уровень 1* - операционная система (не является частью ПО "Крузиз"). Чаще всего на оборудовании оперативного персонала использу-

ется ОС Linux, на оборудовании неоперативно-го персонала - различные версии Windows.

*Уровень 2* - средства абстрагирования от операционной системы. Они, как и уровни 3 и 4, входят в состав ПО «Крузиз». Наличие этого уровня позволяет использовать ПО полуфабрикатного режима (ПФР) с разными операционными системами без изменений в прикладных программах: для перехода к другой операционной системе достаточно заменить библиотеку программных средств уровня 2 и перекомпилировать ПО уровней 3 и 4. Программные средства уровня 2 пользовательского интерфейса не имеют и обслуживания не требуют.

*Уровень 3* - базовые сервисы. Уровень реализует механизмы взаимодействия между прикладными программами. Сервисы реализуют свои функции путем вызова программ из библиотеки функций ПО "Крузиз". В состав ИС входят следующие *базовые сервисы*:

- *сервис запуска ПО* обеспечивает управление остальными включенными в конфигурацию системы сервисами;

- *сервис хранилища* обеспечивает функционирование размещенных на жестком диске каждой ЭВМ ИС файлов (Хранилища данных), содержащих информацию о конфигурации и настройках системы и необходимые для рестарта накапливаемые данные. Сервис выполняет, в том числе, синхронизацию Хранилищ разных ЭВМ;

- *сервис диспетчера* обеспечивает организацию взаимодействия и обмена данными между модулями диспетчера, выполняющими функции приема, обработки и передачи данных. Каждый модуль диспетчера может обмениваться данными с диспетчером через специализированный программный интерфейс. Диспетчер хранит перечни входных и выходных данных каждого включенного в конфигурацию модуля, и по приходу от данных от любого модуля раздает заинтересованным в них модулям. Включение в конфигурацию нового модуля может выполняться как при остановленном, так и при работающем диспетчере;

- *сервис протокола сообщений* обеспечивает функционирование протокола событий;

- *сервис архива* обеспечивает функционирование аппаратного архива;

- *сервис самодиагностики* обеспечивает контроль состояния оборудования.

*Уровень 4* - прикладные программы и модули, выполненные в виде программных библиотек. Программные средства данного уровня комплексно разработаны по единым требованиям, что исключает проблемы совместимости нижнего и верхнего уровней разработанной платформы.

### **Обеспечение надежности предлагаемых разработанных ИВС**

Надежность реализованных на единой платформе решений обеспечивается следующим [6, 7]:

- оборудование изготовлено серийно по техническим условиям под контролем надзорных органов;

- программные средства разработаны в соответствии изложенными в МЭК 60880 и 62138 требованиями процедуре разработки ПО систем, важных для безопасности;

- организация программной среды обеспечивает возможность резервирования оборудования;

- ряд важных для безопасности функций реализован в нескольких (не менее двух) вариантах в разных программных модулях, обеспечена возможность одновременной работы альтернативных алгоритмов и автоматического сравнения результатов;

- в системах с дублированной структурой для повышения надежности на основе разнообразия реализована мультиплатформенность ПО, позволяющая на основном и резервном оборудовании использовать разные операционные системы;

- прием данных от измерительной аппаратуры и обработка данных выполняются в жестком цикле по принципу "все всегда", что обеспечивает отсутствие зависимости загруженности (работоспособности) системы от режимов работы контролируемого объекта.

В ИВС модернизированного энергоблока используется российская операционная система Astra Linux «Смоленск», сертифицированная в системах сертификации средств защиты информации ФСТЭК России. В роли основного программного обеспечения выступает аттестованное в «Ростехнадзор» программное обеспечение «Крузиз» 3.3. Разработчиком программного обеспечения является ООО «ИФ СНИИП АТОМ», что дает возможность дальнейшего всестороннего развития этой программной платформы. Внедрение отечественных программных продуктов хорошо отражает общее направление развития во всех отраслях Российского производства после 2014 года.

Модульная структура построения с возможностью гибкого распределения функций между компьютерами позволяет распределять нагрузку и определять индивидуальные роли каждого сервера, шлюза и т.д. Клиент-серверная архитектура, используемая в классических решениях, ограничена вычислительными возможностями обработки данных в сервере.

Модульный подход позволяет иметь всего один дистрибутив программного обеспечения, а пакет настраиваемых «профилей» оборудования позволяет оперативно конфигурировать один «системный блок» под любые задачи, от шлюза до сервера. Эти свойства программного обеспечения дают возможность иметь универсальный резерв оборудования при ограниченном количестве ЗИП.

### Заключение

В результате выполнения работ по модернизации 4 энергоблока АЭС был разработан уникальный программно-технический комплекс, построенный на модульном принципе и объединивший различные функции вычислительных систем энергоблока. Достигнуты цели по унификации представления данных оператору от различных систем энергоблока, унифицировано представление данных различным группам пользователей. Расширены возможности представления данных. Получены новые возможности информационной поддержки оператора, облегчающие оценку состояния оборудования и принятия решения по управлению блоком. Повышена надёжность и устойчивость работы оборудования за счет применения принципов дублирования, резервирования и разнообразия. Унифицированы технические средства программно-технического комплекса, что значительно упростило его эксплуатацию.

На энергоблоке создана информационно-вычислительная система, имеющая расширенные возможности интерфейса, гибкость конфигурации, большой набор вспомогательных инструментов и неограниченный потенциал по расширению как обрабатываемых параметров, так и функционала работы.

### Литература

1. Поваров В.П., Бакиров М.Б., Данилов А.Д. Автоматизированная система многопараметрического мониторинга параметров состояния энергетических установок АЭС. Воронеж: Научная книга, 2017. 276 с.

2. Поваров В.П., Бакиров М.Б., Данилов А.Д. Обработка данных в системе непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов энергетических установок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т.14. № 1. С. 64-72.

3. Intellectual decision-making system in the context of potentially dangerous nuclear power facilities / A. Danilov, V. Burkovsky, S. Podvalny, K. Gusev, V. Povarov // MATEC Web of Conferences. 13. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018". 2018. С. 2009.

4. Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterruptible condition monitoring / V. Povarov, A. Danilov, V. Burkovsky, K. Gusev // MATEC Web of Conferences. 13. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018". 2018. С. 2012.

5. Терехов Д.В., Сидоренко Е.В., Данилов А.Д. Тенденции развития АСУТП на Нововоронежской АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 66-76.

6. Терехов Д.В., Данилов А.Д. Проблема разработки принципов организации информационного обмена между иерархическими уровнями в многоуровневых АСУТП // Информационные технологии моделирования и управления. 2021. Т. 124. № 2. С. 151-157.

7. Поваров В.П., Терехов Д.В., Данилов А.Д. Особенности использования многоуровневой конфигурации специализированной информационной системы в задачах реализации принципа разнообразия систем безопасности 4-го блока Нововоронежской АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. № S1. С. 41-45.

8. Данилов А.Д., Синюков Д.С. Механизм распределения данных о специальных транзакциях с оперативным контентом в реальном времени на основе кэширования в гетерогенных объектах распределенной сети // Информационные технологии моделирования и управления. 2021. Т. 125. № 3. С. 216-223.

9. Терехов Д.В., Данилов А.Д. Обработка потоков данных в информационных системах верхнего уровня управления процессами // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 1 (75). С. 67-70.

10. Данилов А.Д., Терехов Д.В. Особенности архитектуры информационной системы реального времени // Системы управления и информационные технологии. 2018. № 4 (74). С. 49-54.

Поступила 08.11.2021; принята к публикации 15.12.2021

### Информация об авторах

**Синюков Денис Сергеевич** – заместитель начальника цеха тепловой автоматики, филиал АО «Концерн Росэнергоатом», «Нововоронежская атомная станция» (396072, Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1), e-mail: sinyukovds@nvnpp1.rosenergoatom.ru

**Данилов Александр Дмитриевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Самоденко Александр Александрович** - начальник цеха тепловой автоматики, филиал АО «Концерн Росэнергоатом», «Нововоронежская атомная станция» (396072, Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1), e-mail: sinyukovds@nvnpp1.rosenergoatom.ru

**Иванников Антон Андреевич** - начальник участка ИВС цеха тепловой автоматики, филиал АО «Концерн Росэнергоатом», «Нововоронежская атомная станция» (396072, Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1), e-mail: sinyukovds@nvnpp1.rosenergoatom.ru

**DEVELOPMENT OF A DISTRIBUTED INFORMATION AND COMPUTING CONTROL SYSTEM FOR THE NUCLEAR UNIT AT NOVovorONEZH NPP**  
**D.S. Sinyukov<sup>1</sup>, A.D. Danilov<sup>2</sup>, A.A. Samodeenko<sup>1</sup>, A.A. Ivannikov<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Branch of JSC "Concern Rosenergoatom" of "Novovoronezh Nuclear Power Plant",  
Novovoronezh, Russia**

**<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** nuclear units of nuclear power plants have a long service life, which leads to a situation when, during the operation, the technical and software tools of control systems no longer meet the current modern requirements in terms of reliability and safety of their use. As a result, in order to extend the validity period of the nuclear unit, mandatory modernization of the information and computing system (ICS) of management is required. This article presents the results of such work carried out at Unit 4 of the Novovoronezh NPP. When choosing the equipment to create a new ICS of the upgraded power unit, we implemented the principle of unification. The software of all components of the ICS software and hardware complex, including the functions of systems for providing security parameters and in-reactor control, is implemented on unified software tools. The representation of signal parameter values at all workstations of the software and hardware complex of the information system, the interfaces of human-machine interface interaction and navigation through video frames are identical, which takes into account the requirements for optimal interaction of the man-machine system. The system meets the requirements for ensuring reliability based on redundancy, independence, diversity, taking into account failures for a common reason. For this purpose, we implemented the ICS in the form of a two-channel information system. The main and backup channels of measurement and data processing in the ICS software and hardware complex function simultaneously in full. The developed information and computing system made it possible to extend the service life of 4 power units of the Novovoronezh NPP for 15 years

**Key words:** information and computing system, client-server architecture, parameter control, object interface device, data archive

**References**

1. Povarov V.P., Bakirov M.B., Danilov A.D. "Automated system of multiparametric monitoring of parameters of the state of NPP" ("Avtomatizirovannaya sistema mnogoparametricheskogo monitoringa parametrov sostoyaniya energeticheskikh ustanovok AES"), Voronezh: Nauchnaya kniga, 2017, 276 p.
2. Povarov V.P., Bakirov M.B., Danilov A.D. "Data processing in the system of continuous monitoring of operational damage of critical elements of power plants", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 1, pp. 64-72.
3. Danilov A., Burkovsky V., Podvalny S., Gusev K., Povarov V. "Intellectual decision-making system in the context of potentially dangerous nuclear power facilities", *MATEC Web of Conferences. 13. Ser. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics", Zavalishin's Readings*, 2018, pp. 2009.
4. Povarov V., Danilov A., Burkovsky V., Gusev K. "Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterrupted condition monitoring", *MATEC Web of Conferences. 13. Ser. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics", Zavalishin's Readings*, 2018, pp. 2012.
5. Terekhov D.V., Sidorenko E.V., Danilov A.D. "Trends in the development of automated control systems at Novovoronezh NPP", *News of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika)*, 2017, no. 3. pp. 66-76
6. Terekhov D.V., Danilov A.D. "Problem of developing the principles of organizing information exchange between hierarchical levels in multi-level automated control systems", *Information Technologies of Modeling and Management (Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya)*, 2021, vol. 124, no. 2, pp. 151-157.
7. Povarov V.P., Terekhov D.V., Danilov A.D. "Features of using a multi-level configuration of a specialized information system in the tasks of implementing the principle of diversity of safety systems of the 4th block of the Novovoronezh NPP", *Nuclear and Radiation Safety (Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost')*, 2019, no. S1, pp. 41-45.
8. Danilov A.D., Sinyukov D.S. "Mechanism for distributing data on special transactions with operational content in real time based on caching in heterogeneous objects of a distributed network", *Information Technologies of Modeling and Management (Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya)*, 2021, vol. 125, no. 3, pp. 216-223.
9. Terekhov D.V., Danilov A.D. "Processing of data flows in information systems of the top level of process management", *Management Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2019, no. 1 (75), pp. 67-70.
10. Danilov A.D., Terekhov D.V. "Features of the architecture of the real-time information system", *Management Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2018, no. 4 (74), pp. 49-54.

Submitted 08.11.2021; revised 15.12.2021

**Information about the authors**

**Denis S. Sinyukov**, Deputy Head of the Thermal Automation Shop, Branch of JSC Rosenergoatom Concern of Novovoronezh Nuclear Power Plant (1 Yuzhnaya Industrial Zone, Novovoronezh 396072, Voronezh Region, Russia), e-mail: sinyukovds@nvnpp1.rosenergoatom

**Aleksandr D. Danilov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 324006, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Aleksandr A. Samodeenko**, Head of the Thermal Automation Shop, Branch of JSC Rosenergoatom Concern of Novovoronezh Nuclear Power Plant (1 Yuzhnaya Industrial Zone, Novovoronezh 396072, Voronezh Region, Russia), e-mail: sinyukovds@nvnpp1.rosenergoatom.ru

**Anton A. Ivannikov**, Head of the IVS section of the thermal automation workshop, Branch of JSC Rosenergoatom Concern of Novovoronezh Nuclear Power Plant (1 Yuzhnaya Industrial Zone, Novovoronezh 396072, Voronezh Region, Russia), e-mail: sinyukovds@nvnpp1.rosenergoatom.ru

## ТЕХНОЛОГИЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ, ЗАВИСЯЩИХ ОТ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ

А.А. Коротышева, С.Н. Жуков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
г. Нижний Новгород, Россия

**Аннотация:** отображение навигационной информации в виде проекции на лобовое стекло автомобиля или стекло мотошлема обеспечивает ее восприятие водителем без переключения внимания с дороги на приборную панель, тем самым повышая безопасность дорожного движения. Используемые в настоящее время технологии визуализации информации для навигационного оснащения автомобиля или мотоцикла достаточно дороги и мало распространены, поэтому создание простого и недорогого в разработке программного обеспечения с открытым кодом, повышающего эффективность обработки и отображения информации, представляется актуальным. Предложена архитектура построения подобной системы навигации с применением технологии подсказок водителю в виде объектов дополненной реальности и использованием открытых геоинформационных сервисов. Рассмотрены применяемые в технологии структуры и типы данных, а также возможный набор аппаратных средств визуализации навигационной информации. Алгоритмы визуализации динамических объектов дополненной реальности и обработки геоданных реализованы в программном коде на языке Python. Разработан интерактивный интерфейс, обладающий интегрированным эффектом от совмещения преимуществ навигационных систем и сервисов геоинформационных данных. Приведены результаты тестирования работы кода при визуализации направления движения по заданному маршруту в режиме реального времени

**Ключевые слова:** дополненная реальность, визуализация объектов, геоинформационные системы, построение маршрута

### Введение

С информационными технологиями и их внедрением в различных сферах тесно связано создание новых технологических направлений. Одним из таких направлений является технология дополненной реальности (англ. augmented reality, AR). Значительный интерес к использованию и развитию AR проявляют крупнейшие технологические гиганты - Google, Apple, Microsoft и Яндекс.

Интересным и перспективным применением дополненной реальности являются системы навигации в сфере авто- и мототранспорта. Основная идея - предоставить водителю навигационную и другую необходимую информацию в виде интерактивной проекции на лобовое стекло автомобиля или мотоциклетного шлема. Поскольку проецируемая информация будет находиться на уровне глаз водителя, он сможет ее воспринимать, не отвлекаясь от вождения и отслеживания ситуации на дороге, что обеспечит повышение безопасности движения. Разработки в этом направлении в настоящее время активно проводятся во всем мире [1, 2].

Актуальной задачей представляется разработка программного обеспечения системы ви-

зуализации дополненной реальности для навигационного оснащения автотранспортных средств, повышающей эффективность обработки и отображения объектов с динамическими параметрами, зависящими от геоинформационных данных.

### Дополненная реальность в навигации

Визуальное представление информации основано на зрительных образах, воспринимаемых человеком. Таким образом, задача системы - сформировать изображение, которое можно использовать. Учитывая, что изображение является наиболее информативным и понятным для человека, такие системы распространены достаточно широко.

Взаимодействие окружающей среды с дополненной реальностью достигается за счет совместной работы устройств, имеющих камеру, и специального программного обеспечения. Принцип взаимодействия заключается в создании изображения, подающегося на экран пользовательского устройства, получаемого путем совмещения захватываемого изображения с камеры устройства в режиме реального времени и накладываемых на него различных виртуальных объектов.

Средствами дополненной реальности можно не только показать местоположение необходимого объекта в пространстве, но и показать возможные действия пользователя или их варианты. При этом весь процесс может быть разбит по отдельным шагам. Такие «подсказки» в виде визуальных указаний могут быть особенно полезны для действий пользователей в режиме реального времени.

Примером визуальных указаний является навигация внутри помещений или на местности, позволяющая отобразить варианты маршрута до выбранного пользователем местоположения, отображая смоделированные указатели прямо на дороге [3]. При этом пользователь не отвлекается на бумажную карту местности или навигатор, что является зачастую неудобным, а иногда и просто опасным, как, например, при управлении транспортным средством.

Несмотря на то, что технологию HUD («проекционный дисплей»), которая пришла из военной авиации [4], начали использовать в автомобилях уже достаточно давно (больше 20 лет), пока она применяется преимущественно в автомобилях бизнес-класса. Особенностью использования технологии дополненной реальности в автомобилях и мотоциклах является то, что проекция дополненной реальности должна накладываться на участок дороги, который водитель видит непосредственно перед собой, и оперативно меняться с учетом дорожной ситуации [5]. Представление информации, таким образом, позволяет избежать частого переключе-

чения внимания и зрительного контакта с дорожной обстановкой на дальнем расстоянии на близко расположенную панель приборов автомобиля или мотоцикла.

В настоящее время для автомобильных и мотоциклетных HUD используются: зеркальное отражение изображения от светодиодного источника, лазерная голография и лазерная сканирующая технология. Например, в автомобильной системе навигации CyberNavi, выпускаемой Pioneer, используется HUD на основе твердотельных зеленых лазеров. В мотоциклетном шлеме Jarvish X-AR на проекционный экран выводятся навигационные сведения, скорость, запас топлива, время, прогноз погоды, пробки, проверка почты и входящих сообщений [6]. Для управления шлемом используется голосовой помощник. Перспективы HUD связаны с лазерными технологиями, голосовым управлением, контролем жестов, 3D-визуализацией, ночным видением [7].

### Программная реализация

Архитектура построения системы навигации с AR и программная реализация определяются основной решаемой задачей - прокладывание маршрута и его визуализация на проекционном дисплее в виде объектов «подсказок-указателей» дополненной реальности с динамическими параметрами в зависимости от геоинформационных данных (рис. 1).



Рис. 1. Архитектура системы навигации с AR

Кроме прокладывания маршрута система навигации с интегрированной AR должна обращать внимание водителя на потенциальные опасности и предоставлять другую важную информацию (скорость, запас топлива и т.п.). Интерфейс системы должен иметь возможность настройки.

В качестве источника геоинформационных данных при реализации системы дополненной реальности был выбран OpenStreetMap (OSM) - проект с открытым исходным кодом, который

является аналогом плиточных картографических сервисов, используемых такими системами, как OpenLayers. OSM имеет глобальные векторные данные на уровне улиц и других пространственных объектов [8]. Структура данных OSM показана на рис. 2.

Модель данных OSM использует двумерные данные в проекции WGS84. В XML нотации объекта типа линия сначала идет описание необходимых объектов типа точка, затем запись о самой линии, включающей все ее точки.

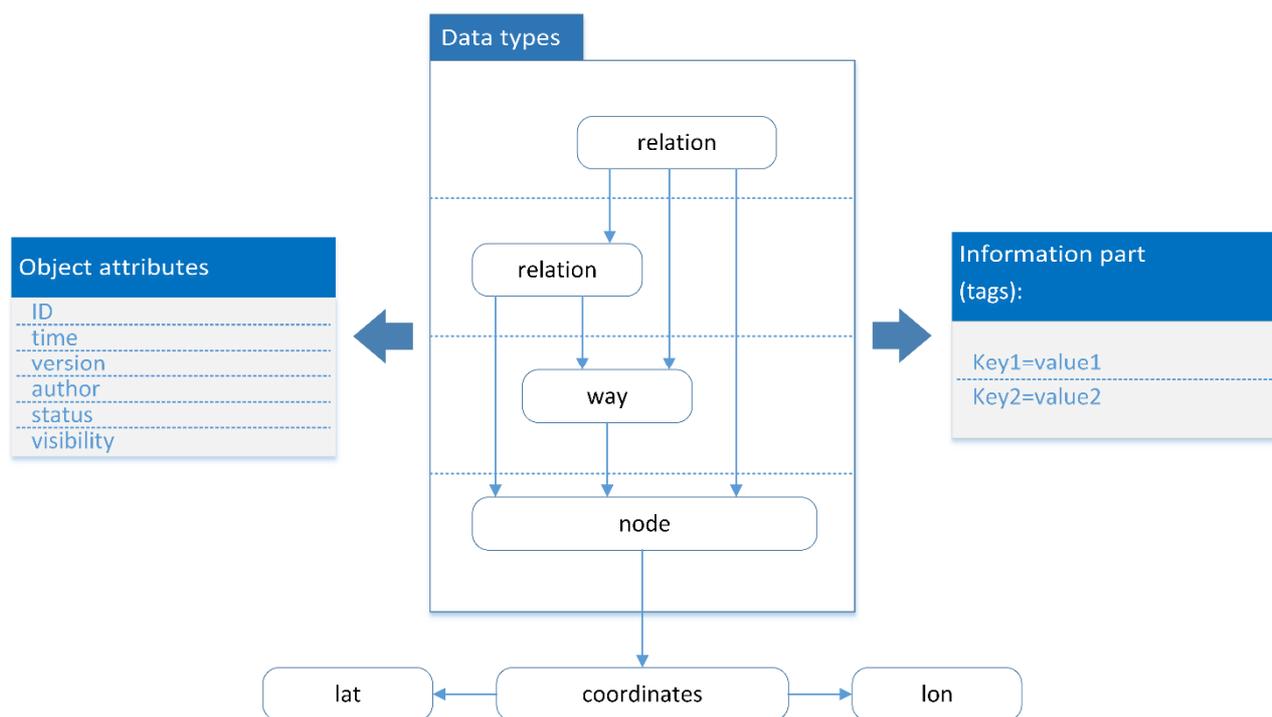


Рис. 2. Структура данных OSM

Дорожную сеть можно представить в виде графа, где ребра - это дороги, а вершины - перекрестки и конечные точки. Оптимальный маршрут характеризуется минимальным расстоянием или временем. В ГИС используются алгоритмы вычисления маршрута с выполнением предварительной обработки графа для ускорения работы отдельных запросов и более эффективного использования памяти, например, Contraction Hierarchies [9].

Для построения маршрутов был выбран маршрутный сервис OSRM (Open Street Routing Machine) - открытый проект с http-сервисом, использующий для оптимизации маршрута алгоритм Contraction Hierarchies [10]. В основе этого алгоритма лежат известные алгоритмы поиска маршрута Дейкстры, определяемого выражениями (1) и (2) и A\* алгоритма, с использованием выражения (3).

$$d[v] = d[p], \quad (1)$$

$$d[to] = (d[to], d[v] + len), \quad (2)$$

где  $d[v]$  - текущая длина для  $v$  - вершины кратчайшего пути из  $s$  в  $v$ .

Изначально  $d[s] = 0$ , а для всех остальных вершин эта длина равна бесконечности.

$$f(n) = g(n) + h(n), \quad (3)$$

где  $f(n)$  - минимальная стоимость перехода в соседний узел,  $g(n)$  - стоимость пути от начальной вершины до любой другой,  $h(n)$  - эвристическое приближение стоимости пути от узла  $n$  до конечного узла.

При задании точек маршрута выполняется пересчет координат из широты/долготы в проекцию Меркатора/WGS84 по формулам (4, 5).

$$X = a \cdot lon, \quad (4)$$

$$Y = a \ln \left[ \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{lat}{2} \right) \left( \frac{1 - e \cdot \sin lat}{1 + e \cdot \sin lat} \right)^{\frac{e}{2}} \right], \quad (5)$$

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2},$$

где  $lon/lat$  - долгота/широта в радианах,  $a$  и  $b$  - большая и малая полуоси эллипсоида WGS84,  $e = \sqrt{2f - f^2}$  - эксцентриситет эллипса,  $f = (a - b)/a$  - коэффициент уплощения Земли.

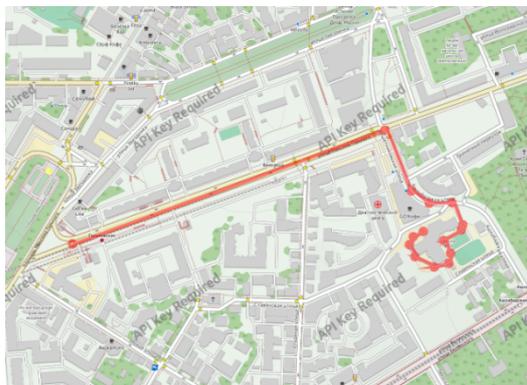
При построении маршрута считываются начальная и конечная координаты маршрута, их значения обрабатываются и передаются в маршрутный сервис OSRM. Результат в виде последовательности координат записывается в файл маршрута для дальнейшего использования.

Для определения собственных координат используется приемник GPS спутниковой системы навигации, определяющей местоположение. После чего производится чтение координат из файла маршрута, отправляется запрос на получение тайлов с серверов OpenStreetMap по крайним координатам маршрута с необходимым зумом. Скаченные тайлы объединяются в карту; считанные координаты переводятся в систему координат карты и визуализируются посредством 2D-графики.

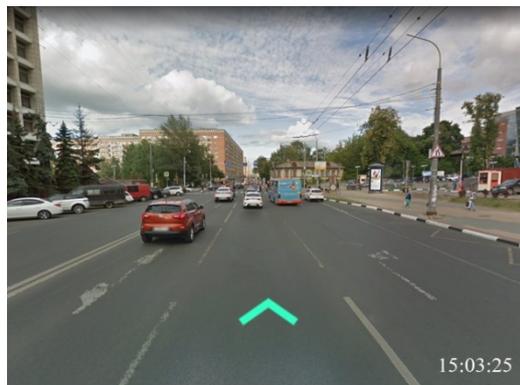
Видеопоток с камеры поступает в функцию отрисовки объекта. Производится обработка и анализ каждого кадра видеопотока. При успешном считывании текущей координаты расстояния до следующего положения и азимута вычисляется маска объекта, его растяжение и поворот, позволяя однозначно задать положение объекта в пространстве. Затем производится отрисовка объекта и его вывод на проекционный дисплей.

### Результаты моделирования

Алгоритмы визуализации динамических объектов дополненной реальности и обработки геоданных реализованы в программном коде на языке Python. При проведении моделирования программа в режиме реального времени производит рендеринг карты с отрисовкой маршрута и выводила на экран с изображением дороги, полученным от видеокамеры, дополнительный слой с визуализацией направления движения по заданному маршруту в виде «подсказок» стрелок-указателей (рис. 3).



а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Результаты моделирования: а) маршрут; б) начальная точка маршрута; в) точка поворота направо; г) точка плавного поворота налево

Маршрут сохраняется в отдельном файле формата json. При проведении моделирования с GPS приемника были записаны данные по скорости (рис. 4), которые, наряду со стрелками-указателями, также могут быть представлены водителю.

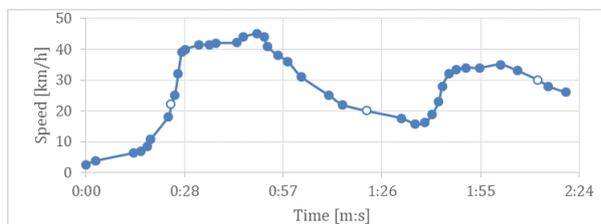


Рис. 4. График скорости автомобиля при моделировании

Сравнение полученных результатов моделирования с результатами работы штатного навигатора автомобиля показало их сопоставимость и подтвердило эффективность разработанной программы.

### Заключение

Предложенный способ визуализации объектов с динамическими параметрами, зависящими от геоинформационных данных, с использованием открытых сервисов OSRM и OpenStreetMap, позволил разработать интерактивный интерфейс, обладающий интегрированным эффектом от совмещения преимуществ навигационных систем и сервисов геоинформационных данных. Разработанный программный код на языке Python может быть использован в системе навигационного оснащения автомобиля или мотоциклетного шлема. Совершенствование алгоритмов и развитие программы может представлять интерес по следующим направлениям: повышение скорости выполнения программного кода

путем разработки его части на языке C++; повышение информативности интерфейса (вывод скорости движения, расхода топлива и т.п.); дополнение моделей визуализации голосовыми сообщениями (подсказками).

### Литература

1. Кузнецов В.А., Руссу Ю.Г., Куприяновский В.П. Об использовании виртуальной и дополненной реальности // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7. № 4. С. 75-84.
2. Иванова А.В. Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения // CPPM. 2018. № 3 (108). С. 88-107.
3. Построение маршрутов в дополненной реальности с использованием гис-технологий / А.В. Юдин, А.Н. Стратиевко, М.М.У. Мадумаров, М.А. Мирненко // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2020. № 3. С. 189-196.
4. Горбунов А.Л., Нечаев Е.Е. Мобильный комплекс дополненной реальности для управления воздушным судном // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. 2015. № 1 (13). С. 82-87.
5. Electronics and LED Driver Reference Design for Augmented Reality Head-up Displays. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2018. URL: [https://www.ti.com/lit/ug/tiduee5/tiduee5.pdf?ts=1619522321984&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FTIDA-080004](https://www.ti.com/lit/ug/tiduee5/tiduee5.pdf?ts=1619522321984&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FTIDA-080004) (дата обращения: 27.04.2021).
6. Brochure about JARVISH X. URL: <https://mk0jarvishcomqmnjfw9.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2020/02/X-1.pdf> (дата обращения: 13.04.2021).
7. Инновационная технология ночного видения DENSO. URL: <https://www.denso-am.ru/novosti/novosti-produktam/2015/innovatsionnaia-tekhnologii-nochnogo-videniia-denso/> (дата обращения: 13.04.2021).
8. OpenStreetMap — wiki-карта мира [Электронный ресурс]. URL: <https://www.openstreetmap.org/>.
9. Contraction Hierarchies: Faster and Simpler Hierarchical Routing in Road Networks / Robert Geisberger, Peter Sanders, Dominik Schultes, and Daniel Delling // WEA, 2008. Pp. 319-333.
10. Высокопроизводительный модуль маршрутизации, предназначенный для работы с данными OpenStreetMap. URL: <http://project-osrm.org/docs/v5.22.0/api/#general-options>.

Поступила 14.10.2021; принята к публикации 15.12.2021

### Информация об авторах

**Коротышева Анна Андреевна** – магистрант радиофизического факультета, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (603022, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23), e-mail: [ania.korotishewa@yandex.ru](mailto:ania.korotishewa@yandex.ru), тел. 89200193495

**Жуков Сергей Николаевич** - канд. физ.-мат. наук, доцент, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (603022, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23), e-mail: [jsn@rf.unn.ru](mailto:jsn@rf.unn.ru)

## VISUALIZATION TECHNOLOGY OF AUGMENTED REALITY OBJECTS, DEPENDING ON GEOINFORMATIONAL DATA

A.A. Korotysheva, S.N. Zhukov

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract:** displaying navigation information in the form of a projection onto the windshield of a car or the glass of a motorcycle helmet ensures its perception by the driver without switching attention from the road to the dashboard, thereby increasing road safety. The currently used information visualization technologies for the navigation equipment of a car or motorcycle are quite expensive and not widely used, therefore, the creation of simple and inexpensive open-source software that increases the efficiency of information processing and display seems to be relevant. The article proposes an architecture for building such a navigation system using the technology of prompting the driver in the form of augmented reality objects and using open geoinformation services. We considered the structures and types of data used in technology, as well as a possible set of hardware for visualization of navigation information. We implemented algorithms for visualization of dynamic objects of augmented reality and processing of geodata in the program code in the Python language. We developed an interactive interface that has an integrated effect of combining the advantages of navigation systems and geoinformation data services. We give the results of testing the code when visualizing the direction of movement along a given route in real time

**Key words:** augmented reality, visualization, geoinformation systems, route construction

### References

1. Kuznetsov V.A., Russu Iu.G., Kupriyanovskiy V.P. "On the use of virtual and augmented reality" *Int. J. of Open Information Technologies*, 2019, vol. 7(4), pp. 75-84.
2. Ivanova A.V. "VR & AR technologies: opportunities and application obstacles", *Strategic Solutions and Risk Management (Strategicheskie resheniia i risk-menedzhment)*, 2018, vol. 3(108), pp. 88-107.
3. Iudin A.V., Stratienko A.N., Madumarov M.M.U., Mirnenko M.A. "Construction of routes in augmented reality using GIS technologies", *Bulletin of RUDN University. Series: Engineering Research (Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniia)*, 2020, vol. 21(3), pp. 189-196.
4. Gorbunov A.L., Nechaev E.E. "Mobile complex augmented reality to control the aircraft", *Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defense Corporation (Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antei)*, 2015, vol. 1(13), pp. 82-87.
5. Electronics and LED Driver Reference Design for Augmented Reality Head-up Displays, Dallas: TexasInstruments Incorporated, 2018, available at: [https://www.ti.com/lit/ug/tiduee5/tiduee5.pdf?ts=1619522321984&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252F%252FTIDA-080004](https://www.ti.com/lit/ug/tiduee5/tiduee5.pdf?ts=1619522321984&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252F%252FTIDA-080004) (date of access: 24.04.2021)
6. Brochure about JARVISH X, available at: <https://mk0jarvishcomqmnjfw9.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2020/02/X-1.pdf> (date of access: 13.04.2021)
7. Innovative Night Vision Technology DENSO, available at: <https://www.denso-am.ru/novosti/novosti-produktam/2015/innovatsionnaia-tekhnologiia-nochnogo-videniia-denso/> (date of access: 13.04.2021)
8. OpenStreetMap. *OpenStreetMap Homepage*, available at: <https://www.openstreetmap.org/> (date of access: 13.05.2021)
9. Geisberger R., Sanders P., Schultes D., and Delling D. "Contraction hierarchies: faster and simpler hierarchical routing in road networks", *Proc. of the 7th Workshop on Experimental Algorithms (WEA'08)*, 5038 of *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, pp. 319–333.
10. OSRM API Documentation, available at: <http://project-osrm.org/docs/v5.22.0/api/#general-options>, (date of access: 31.05.2021)

Submitted 14.10.2021; revised 15.12.2021

### Information about the authors

**Anna A. Korotysheva**, MA, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23 Gagarina str., Nizhny Novgorod 603950, Russia), e-mail: [ania.korotishewa@yandex.ru](mailto:ania.korotishewa@yandex.ru),  
**Sergey N. Zhukov**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23 Gagarina str., Nizhny Novgorod 603950, Russia), e-mail: [jsn@rf.unn.ru](mailto:jsn@rf.unn.ru)

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕНА В ГАЗИФИКАТОРЕ

С.В. Бородкин<sup>1</sup>, И.Л. Батаронов<sup>2</sup>, А.В. Иванов<sup>1</sup>, В.И. Рязских<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** на основе одномерной дифференциальной модели теплообмена в газификаторе закрытого типа сформулирована задача параметрической идентификации модели на основе измерений на штатном оборудовании промышленной газификационной установки. Модель включает в себя дополнительное интегральное условие и самосогласованно определяемую подвижную границу, отделяющую зону обледенения трубки испарителя. С применением метода сглаживания особенности разработан алгоритм итерационного решения уравнений модели, использующий метод сквозного счета для решения уравнения переноса на одной итерации. Для параметрической идентификации модели использована смешанная стратегия. Часть идентифицируемых параметров (теплоемкость испарителя, мощность нагревателя, массовая производительность насоса, коэффициент теплоотдачи в окружающую среду) определялась на основе специально организованных измерений: нагрева испарителя без прокачки сверхкритического флюида, газификации в условиях теплоизолированности корпуса испарителя, газификации в стационарном режиме работы. Остальные параметры (коэффициенты теплоотдачи в теплоноситель и сверхкритический флюид) идентифицировались в пассивных измерениях с различными производительностями насоса. Отмечено, что ввиду плохой обусловленности задачи и ограниченности вариаций коэффициентов применение регрессионных методов в данной модели неэффективно. На основе метода стрельбы разработан способ идентификации, заключающийся в определении параметров по измерениям с предельными производительностями с построением функциональной связи между идентифицируемыми параметрами, с последующей верификацией на промежуточных измерениях. Метод апробирован на примере штатной газификационной установки СГУ-7КМ-У

**Ключевые слова:** газификатор, дифференциальная модель теплообмена, параметрическая идентификация, смешанная стратегия

### Введение

Для обеспечения выполнения задач авиацией и поддержания в готовности авиационной техники требуется значительное количество расходных материалов, в том числе кислорода и азота в различных фазовых состояниях, потребность в которых существенно возрастает с появлением новых образцов авиационной техники [1, 2]. В отличие от реализуемой за рубежом стратегии получения газов с помощью бортовых систем, в отечественной авиации применяется подход с использованием системы газообеспечения, включающей наземные средства добычи, хранения, газификации и заправки воздушных судов, дающий ряд существенных преимуществ. Зарядка систем жизнеобеспечения и пневмосистем воздушных судов осуществляется газообразным азотом и кислородом, в то время как получение и хранение их осуществляется в сжиженном виде. Для перевода их в газовое состояние

применяются газификаторы [1, 2], однако процесс газификации является энергозатратным и довольно продолжительным по времени, что говорит о необходимости оптимизации аэродромных газификаторов в целях эффективного решения задач аэродромного обеспечения.

Традиционные методы расчета теплообмена в таких газификаторах, основанные на интегральном уравнении баланса энергии [3-6], оказываются недостаточными для расчета эффективных газификаторов, так как при этом не учитываются особенности теплопередачи в сверхкритических флюидах (СКФ). В связи с этим в последнее время активно развиваются различные дифференциальные и разностные модели теплообмена в газификаторах [7-12]. Однако эти модели в основном ориентированы на газификаторы открытого типа, использующие в качестве теплоносителя окружающую среду. Такие конструкции, пригодные для газификации, например, природных сжиженных газов, не подходят для задач аэродромного обеспечения, требующих стабильности работы в произвольных погодных условиях. Поэтому в аэродромных газификаторах используются

автономные теплоносители с собственными нагревателями (газификаторы закрытого типа). Математическая модель такого газификатора [13] является дифференциальной задачей типа Стефана и не может учесть все особенности реальной конструкции. Поэтому имеется актуальная задача в разработке алгоритма решения данной модели и алгоритма ее параметрической идентификации на основе измерений на штатном оборудовании промышленной установки, что позволит осуществлять расчет и оптимизацию газификаторов [14] в соответствии с задачами обеспечения полетов. Данная задача имеет важное значение и в других отраслях применения газификации, например, энергетике, медицине, металлургии, фармацевтике.

### Математическая модель газификатора

Схема теплообмена в идентифицируемой модели приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема входных и выходных параметров модели теплообмена,  $Q_e$  – тепловой поток во внешнюю среду

Математическая модель теплообмена в газификационной установке рассматриваемого типа [13] включает в себя:

– квазистационарное уравнение переноса энергии в трубке с СКФ

$$M c_p(T, P) \frac{dT}{dx} = \frac{T_h - T}{R(T, T_h, T_{w0}, \overline{T_{w1}}, d(x), P)}, T(0) = T_{in}, \quad (1)$$

– уравнение баланса энергии в теплоносителе

$$C_h \frac{dT_h}{dt} = P_h - [h(T_{out}(t), P) - h(T_{in}, P)]M - \frac{T_h - T_e}{k_e R_e}, T_h(0) = T_{h0}, \quad (2)$$

– уравнение теплового сопротивления для многослойной трубки (с учетом слоя обледенения толщиной  $d$ )

$$R(T, T_h, T_{w0}, \overline{T_{w1}}, P, d) = k_a R_a(T, T_{w0}, P) + R_t + R_s(d) + k_h R_h(T_h, \overline{T_{w1}}, d), \quad (3)$$

– уравнение для давления ГА

$$P = P_0 + (P_1 - P_0)t / t_1.$$

Здесь  $T(x|t)$  – среднemasсовая температура СКФ вдоль трубки теплообменника, параметрически зависящая от времени;  $T_{out}$  – выходная температура СКФ;  $T_{in}$  – входная температура СКФ;  $T_h$  – рабочая температура теплоносителя, предполагаемая фиксированной за счет авторегулирующей функции нагревателя (режим А, левая часть уравнения (2) обращается в нуль), или зависящая от времени  $T_h(t)$  при достижении максимальной мощности нагревателя (режим Б);  $T_e$  – температура среды, в которой находится теплообменник,  $M$  – массовая производительность насоса газификатора (в кг/с),  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость СКФ,  $C_h$  – теплоемкость теплоносителя,  $h$  – удельная энтальпия ГА,  $R_h$  – тепловое сопротивление между трубкой и теплоносителем,  $R_a$  – тепловое сопротивление между СКФ и стенкой трубки,  $R_t$  – тепловое сопротивление трубки испарителя, принимаемое для рассматриваемых температурных условий постоянным,  $R_s$  – тепловое сопротивление слоя кристаллизованной формы теплоносителя, зависящее от толщины слоя  $d$ ,  $R_e$  – тепловое сопротивление между теплоносителем и окружающей средой,  $T_{w0}$  и  $T_{w1}$  – температуры внутренней и внешней (с учетом обледенения) поверхности трубки,  $\overline{T_{w1}}$  – среднее значение температуры  $T_{w1}$  по длине трубки,  $P_h$  – мощность нагревателя,  $P_0$ ,  $P_1$  – начальное и конечное давления СКФ в испарителе,  $t_1$  – длительность цикла газификации, корректирующие коэффициенты  $k_a, k_h, k_e$  являются параметрами модели, подлежащими идентификации.

Для определения дополнительных переменных  $T_{w0}$ ,  $T_{w1}$ ,  $d$  используется система нелинейных уравнений, выражающих непрерывность теплового потока через стенку трубки:

$$\frac{T_h - T}{R(T, T_h, T_{w0}, \overline{T_{w1}}, P, d)} = \frac{T_{w0} - T}{k_a R_a(T, T_{w0}, P)} = \frac{T_h - T_{w1}}{k_h R_h(T_h, \overline{T_{w1}}, d)}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} T_{w1} = T_s, & d > 0 \\ d = 0, & T_{w1} > T_s \end{cases}$$

В области обледенения трубки температура  $T_{w1}$  задана, и система (4) определяет величины  $T_{w0}$ ,  $d$ . Вне области обледенения толщина

$d$  равна нулю, и система (4) определяет температуры  $T_{w0}$ ,  $T_{w1}$ . Граница между этими областями заранее не известна и находится в результате решения как точка переключения между условиями в (4). Это обстоятельство делает рассматриваемую модель родственной задаче Стефана. Кроме того, величина  $\overline{T_{w1}}$  вычисляется через интеграл от распределения температуры  $T_{w1}$ , что фактически делает задачу в целом интегро-дифференциальной.

Выражения для тепловых сопротивлений  $R_h$ ,  $R_e$  берутся для соответствующих условий свободно-конвективного теплообмена [15], выражение для  $R_a$  взято по результатам модельного расчета турбулентного теплопереноса в потоке сверхкритического флюида [16], для теплофизических характеристик сред использованы специально построенные аппроксимации [17].

Подгоночными параметрами модели, подлежащими идентификации, являются производительность насоса  $M$ ; мощность нагревателя  $P_h$ ; теплоемкость испарителя  $C_h$  и три корректирующих коэффициента  $k_a, k_h, k_e$ , которые не могут быть получены расчетным путем и должны идентифицироваться экспериментально.

### Алгоритм решения модели

Наличие в уравнении (4) условия переключения, соответствующего задаче типа Стефана, делает задачу неаналитической и при использовании алгоритмов решения задачи Коши высокого порядка приводит к разболтке решения [18]. Для исключения этого эффекта применим метод сглаживания особенности, часто используемый в решении задачи Стефана [18] и позволяющий применить метод сквозного счета. С этой целью запишем пропорцию (4) в виде:

$$\frac{T_h - T_s}{k_h R_h(T_h, \overline{T_{w1}}, d)} = \frac{T_{w0} - T}{k_a R_a(T, T_{w0}, P)},$$

в котором ее можно разрешить относительно параметра  $d$ :

$$d = \frac{D_2}{2} \left( \frac{k_h R_h(T_h, \overline{T_{w1}}, 0)}{k_a R_a(T, T_{w0}, P)} \cdot \frac{T_{w0} - T}{T_h - T_s} - 1 \right). \quad (5)$$

Здесь для заданных значений  $T_{w0}, T$  значение  $d$  определяется явно. Формальное решение уравнения (5) совместно с первым равенством пропорции (4) определяет величину  $d$ , которая здесь может быть как положительной, так и

отрицательной. Последнее фактически означает отсутствие обледенения трубки. С использованием полученной величины  $d$  построим функцию сглаживания в виде сигмоиды:

$$\sigma(d) = \frac{1}{1 + e^{-d/\delta}}, \quad (6)$$

где  $\delta$  – ширина размытия ступеньки, подбираемая эмпирически. Удовлетворительные результаты дает значение  $\delta = 0,1$  мм.

Умножим далее на эту функцию толщину слоя обледенения в уравнениях (3), (4):

$$d \rightarrow \sigma(d)d. \quad (7)$$

При такой замене решение второго уравнения из пропорции (4) для температуры  $T_{w1}$  для положительных значений  $d$ , то есть в зоне обледенения, будет автоматически давать  $T_{w1} = T_s$ , а для отрицательных значений – температуру стенки без обледенения:

$$T_{w1} = T_h - \frac{k_h R_h(T_h, \overline{T_{w1}}, d)}{k_a R_a(T, T_{w0}, P)} (T_{w0} - T).$$

При этом единственным итерационно решаемым уравнением остается уравнение для температуры  $T_{w0}$ :

$$\begin{cases} \frac{T_{w0} - T}{T_h - T} - \frac{k_a R_a(T, T_{w0}, P)}{R(T, T_h, T_{w0}, \overline{T_{w1}}, P, \sigma(d)d)} = 0 \\ d = \frac{D_2}{2} \left( \frac{k_h R_h(T_h, \overline{T_{w1}}, 0)}{k_a R_a(T, T_{w0}, P)} \cdot \frac{T_{w0} - T}{T_h - T_s} - 1 \right) \end{cases}$$

При использовании метода Ньютона и начального приближения  $T_{w0} = T + 20$  К для решения достаточно пяти итераций.

В итоге модель становится аналитической, не содержащей явно подвижной точки, и может решаться методом сквозного счета, например, по схеме Рунге-Кутты [18].

В результате предлагается следующий итерационный алгоритм решения модели (1)–(7):

1. Задание начального распределения температуры стенки  $T_{w0}$ , нулевой толщины  $d$  слоя обледенения, средней температуры наружной стенки трубки  $\overline{T_{w1}}$  и начальной температуры теплоносителя.

II. Цикл решения задачи Коши (2) методом Рунге-Кутты:

1. На каждом шаге по времени в соответствии с четырехшаговым методом расчета схемы четырежды решается уравнение (1) для определения  $T_{out}(t)$ . При этом начальное приближение для уравнения (1) берется из решения для предыдущего шага, что позволяет со-

кратить число итераций до 5. Для решения уравнения (1) организуются внутренние циклы:

а) решение задачи Коши (1), для заданных температуры теплоносителя и температуры  $\overline{T}_{w1}$  методом Рунге-Кутты 4 порядка, с определением температур стенки и толщины обледенения на каждом шаге по уравнениям (4)–(7);

б) расчет нового значения температуры  $\overline{T}_{w1}$ .

2. Последний расчет уравнения (1), после окончательного определения нового значения температуры теплоносителя, дает величину  $T_{out}$  на новом шаге по времени.

Как показал вычислительный эксперимент, данная итерационная схема устойчиво сходится, и обычно достаточно 10 итераций во внутреннем цикле.

Пример расчета по данному алгоритму приведен на рис. 2.

Отметим, что вследствие многократного проведения итерационных процедур, в том числе для решения нелинейной системы уравнений (4)–(7), данный алгоритм работает сравнительно медленно, что необходимо учитывать в процедуре параметрической идентификации модели.

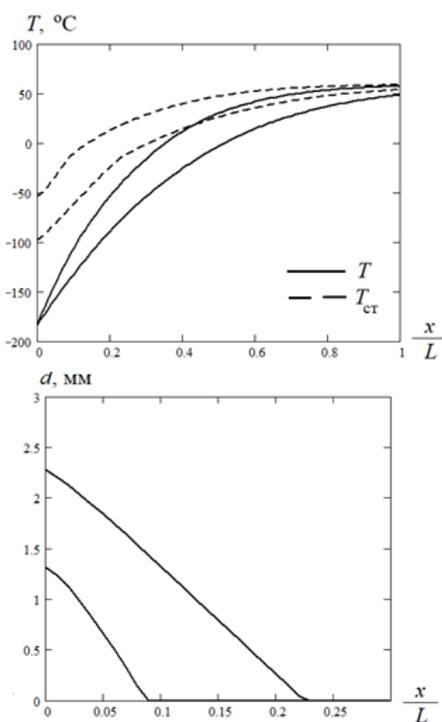


Рис. 2. Пример решения уравнений модели по разработанному алгоритму для распределения температуры по длине трубки и толщине слоя обледенения для двух моментов времени

## Методика идентификации

Для идентификации модели используется смешанная стратегия [19, 20]. Часть параметров может быть определена по результатам специально поставленных измерений (активные эксперименты), а другая часть определяется по результатам пассивного эксперимента.

Для определения теплоемкости испарителя  $C_h$  и мощности нагревателя  $P_h$  проводится эксперимент по нагреву испарителя в условиях тепловой изоляции корпуса и без прокачки СКФ. Тогда, согласно уравнению (2), температура теплоносителя возрастает со временем линейно, и по регистрируемой величине расхода электроэнергии  $J$ , времени нагрева  $\Delta t$  и достигаемого прироста температуры  $\Delta T$  находятся эти параметры:

$$P_h = \frac{J}{\Delta t}, \quad C_h = \frac{J}{\Delta T}.$$

Затем в двух измерениях, поставленных при одинаковом расходе  $M_e$  с теплоизолированным и неизолированным корпусом определяется увеличение  $\delta T$  выходной температуры СКФ при теплоизоляции. При условии малости величины  $\delta T$  из уравнения (2) нетрудно получить соотношение

$$k_e = \frac{T_h - T_e}{M_e c_p (T_{out}, P) R_e \delta T}. \quad (8)$$

Наконец, в некотором диапазоне параметров в установке реализуется стационарный режим с максимальной мощностью нагревателя, при котором левая часть уравнения (2) обращается в нуль. При постановке пассивного эксперимента с широким варьированием параметров этот режим в одном из опытов обязательно появится при некотором значении производительности  $M_s$ , поэтому такой опыт можно рассматривать как активный эксперимент. В этом случае из уравнения (2) будем иметь

$$M_s = \frac{P_h - (T_{hs} - T_e) / (k_e R_e)}{h(T_{out}, P) - h(T_{in}, P)}. \quad (9)$$

Связь между производительностями  $M_e$  и  $M_s$  устанавливается отношением  $r$  ходов поршня насоса в этих экспериментах:  $M_g = r M_s$ . Тогда система уравнений (8) и (9) легко разрешается относительно параметров  $M_{e,s}$  и  $k_e$ , что и определяет эти параметры.

Для определения оставшихся параметров  $k_a, k_h$  используется методика пассивной стратегии на основе измерений выходной температуры СКФ при различных значениях произво-

дительности газификатора. При этом обнаруживаются следующие особенности:

1. Модель плохо обусловлена по отношению к варьированию указанных параметров, которые могут изменяться в ограниченных пределах взаимосвязанно друг с другом. Поэтому применение традиционных регрессионных методов идентификации [19, 20] оказывается неэффективным, поскольку может приводить в расходимости алгоритма.

2. Решение модели требует значительных временных ресурсов, поэтому методика должна минимизировать объем расчетов по модели.

В связи с этим предлагается следующая методика идентификации модели.

1. По выходной температуре в конце процесса газификации для двух предельных значений производительности методом стрельбы рассчитываются параметры  $k_a, k_h$ .

2. Для промежуточных значений производительности производится верификация модели по выходной температуре СКФ.

В свою очередь, стрельба по двум измерениям с учетом жесткости модели проводится следующим образом.

1. На первом этапе для ряда значений параметра  $k_a$  производится пристрелка параметра  $k_h$  к выходному значению температуры измерения с минимальной производительностью. Для ускорения сходимости целесообразно использовать линейную коррекцию стрельбы [18]. Однако, как показал вычислительный эксперимент, эта корректировка дает быструю устойчивую сходимость, только если пристреливаемое значение температуры заключено в вилку, размах которой не превышает десяти градусов. Поэтому начальное приближение к такой вилке целесообразно делать по методу дихотомии, начиная с большого размаха параметра  $k_h$ . Эта процедура необходима только для пристрелки с первым значением параметра  $k_a$ , поскольку для следующих значений требуемая вилка легко определяется.

По полученной таблице значений строится регрессионная зависимость  $k_a(k_h)$ . Обычно с учетом вида зависимости (3) достаточно простой линейной модели:

$$k_a = b - ak_h. \quad (10)$$

Тогда значения коэффициентов  $b, b/a$  будут равны наибольшим возможным значениям параметров  $k_a, k_h$  для данной установки.

2. На втором этапе с использованием полученной зависимости вида (10) для коэффициента  $k_a$  осуществляется пристрелка по пара-

метру  $k_h$  к выходному значению температуры в измерении с максимальной производительностью установки. При этом применение жесткой связи параметров (10) стабилизирует модель и делает расчет устойчивым.

Отметим, что идентификация модели по предельным режимам обычно обеспечивает ее хорошую согласованность и для промежуточных режимов.

### Обсуждение результатов

Апробация разработанной методики идентификации была проведена на примере газификационной установки СГУ-7КМ-У [21]. В эксперименте осуществлялась прокачка СКФ-кислорода при давлениях 15÷25 МПа, отвечающих закритическому состоянию СКФ.

1. В первой серии измерений производился нагрев установки без прокачки СКФ и получено, что за время 13 мин расход электроэнергии составил 22,11 МДж, а испаритель нагрелся на 45 К. Тогда получаем, что мощность нагревателя составляет 28,35 кВт (совпадает с паспортным значением), а теплоемкость испарителя равна 490 кДж/К.

Во второй серии измерений производилась прокачка СКФ с максимальной производительностью в условиях теплоизоляции корпуса и без нее, и получена разность температур 2,0 К СКФ на выходе. Также при минимальной производительности установки реализовывался стационарный режим с выходной температурой 37°C (при давлении 25 МПа). Отношение ходов поршня насоса в этих измерениях составило  $r = 1,6$ . Тогда с использованием данных по теплофизическим свойствам СКФ-кислорода [17] из уравнений (8) и (9) получаем  $k_e = 0,77$ , минимальная производительность установки 0,08 кг/с, максимальная производительность 0,13 кг/с (также согласуется с паспортными данными). Расчетом на основе величины хода поршня насоса также получено значение промежуточной производительности 0,105 кг/с.

2. Результаты пассивных экспериментов при трех значениях производительности приведены на рис. 3, а исходные параметры для идентификации – в табл. 1.

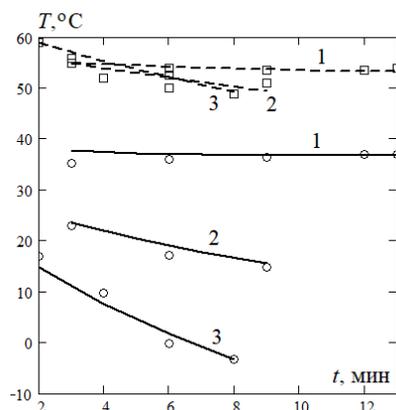


Рис. 3. Данные измерений на установке СГУ-7КМ-У (точки) и результаты расчета по идентифицированной модели (линии) для минимальной (1), средней (2) и максимальной (3) производительности: выходная температура СКФ (кружки, сплошные линии) и температура теплоносителя (квадраты, штриховые линии)

Таблица 1

Исходные измеренные параметры установки для идентификации модели

$M, \text{кг/с}$	$P_0, \text{МПа}$	$t_1, \text{мин}$	$T_{\text{внач}}, \text{°C}$	$T_{\text{out}}, \text{°C}$
0,08	15	10	55	37
0,105	19	6	55	14,8
0,13	19	6	59	-3,2
$P_1 = 25 \text{ МПа}$				

Для построения зависимости (10) были выбраны значения  $k_a = 0.833; 0.91; 1.0; 1.11; 1.25$ .

Вначале решалась модель для  $k_a = 1.0$  по пристрелке к значению температуры  $37^\circ\text{C}$ . Выбираем предельные значения  $k_h = 1.0; 10$  и методом дихотомии сводим вилку значений выходной температуры к  $10^\circ\text{C}$ :

Таблица 2

Результаты дихотомии

$k_h$	1	10	3,33	2	2,5
$T_{\text{out}}, \text{°C}$	48,48	-8,58	35,73	44,15	41,28

Значения для 3,33 и 2,5 образуют требуемую вилку, поэтому применяем к ним линейную коррекцию по формуле:

$$k_{\text{new}} = k_1 + \frac{k_2 - k_1}{T_2 - T_1} (T_0 - T_1). \quad (11)$$

Для корректировки на следующем шаге вилку выбираем с использованием полученного значения. Результат приведен в табл. 3.

Таблица 3

Результаты корректировки

$k_h$	3,33	2,5	3,096	3,145
$T_{\text{out}}, \text{°C}$	35,73	41,28	37,39	37,05

Полученную при дихотомии вилку можно использовать как исходную для решения модели при других значениях  $k_a$ . В итоге получаем следующую таблицу значений:

Таблица 4

Зависимость параметров

$k_h$	3,509	3,344	3,145	2,899	2,584
$k_a$	0,833	0,91	1,0	1,11	1,25

Линейная регрессия этой зависимости дает уравнение:

$$k_a = 2.415 - 0.451k_h. \quad (12)$$

Качество уравнения (12) иллюстрирует рис. 4, показывающий очень хорошее выполнение линейности зависимости.

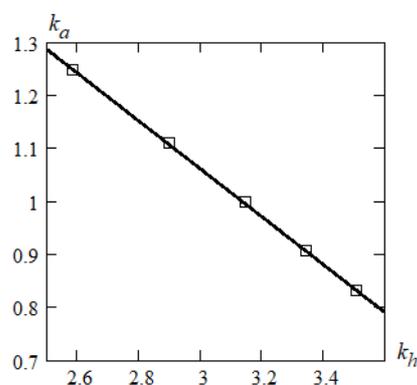


Рис. 4. Сравнение данных табл. 4 с уравнением (12)

Используем далее зависимость (12) для пристрелки к значению выходной температуры  $-3,2^\circ\text{C}$  в расчете с максимальной производительностью. Здесь с учетом данных таблиц 2–4 выбираем вилку в виде:  $k_h = 3.0 \div 3.6$ . Тогда, применяя корректировку (11), окончательно получаем:

$$k_a = 0,84; \quad k_h = 3,497.$$

Результаты расчета модели, идентифицированной этими значениями параметров, для всех производительностей показаны на рис. 3. Верификация модели для средней производительности, а также для промежуточных значений моментов времени показывает хорошее соответствие измеренным значениям в пределах погрешности измерений и точности модели.

### Заключение

Предложенная в работе методика параметрической идентификации нагруженной дифференциальной модели теплообмена отличается простотой реализации, требует минимального числа измерений, проводимых на

штатном оборудовании теплообменной установки, показала экономичное использование вычислительных ресурсов и хорошее соответствие идентифицированной модели результатам измерений.

Применение метода сглаживания особенности для численного решения рассматриваемой модели позволило использовать схему сквозного счета высокого порядка при сохранении устойчивости расчета, при этом получен быстросходящийся алгоритм решения системы дополнительных нелинейных условий.

Построенная в настоящей работе идентифицированная модель была использована в [14] для разработки методики оптимизации функционирования криогенной газификационной установки.

Данная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) по темам: «Разработка исходных тактико-технических данных проектирования мобильных воздухо-разделительных систем нового поколения на основе модернизации теплообменных устройств»; «Обоснование тактико-технических требований к мобильному газификатору сжиженных газов».

#### Литература

1. Зайцев А.В. Криогеника в начале XXI века // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2014. № 1. С. 6.
2. Бородкин С.В., Иванов А.В. Перспективы развития мобильных газификационных установок // Приоритетные направления и актуальные проблемы развития средств наземного обслуживания общего применения: материалы докл. IV всерос. науч.-техн. конф. Воронеж, 2020. С. 5–7.
3. Теплообмен в ядерных энергетических установках / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев. М.: Атомиздат, 1974. 408 с.
4. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / В.С. Авдеевский, Б.М. Галицкий, Г.А. Глебов и др. М.: Машиностроение, 1992. 528 с.
5. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
6. Handbook of Heat Transfer / W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, Y.I. Cho. New-York: McGraw-Hill, 1998. 1501 p.
7. Маринюк Б.Т. Теплообменные аппараты ТНТ. Конструктивные схемы и расчет. М.: Энергоатомиздат, 2009. 200 с.
8. Hisada N., Sekiguchi M., Hisada N. Design and analysis of open rack LNG vaporized // Design and analysis of pressure vessels, heat exchangers and piping components – 2004. San Diego, 2004. PVP-Vol. 477. PVP2004-2602.
9. Jin T., Wang M., Tang K. Simulation and performance analysis of a heat transfer tube in SuperORV // Cryogenics. 2014. V. 61. P. 127–132.
10. Thermal performance calculation and analysis of heat transfer tube in super open rack vaporizer // J. Pan, R. Li, T. Lv, G. Wu, Z. Deng // Applied Thermal Engineering. 2016. V. 93. P. 27–35.
11. Thermal performance analysis of SuperORV heat transfer tube at supercritical pressure / J. Pan, R. Li, T. Lv, G. Wu // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. V. 29. P. 488–496.
12. Thermal performance analysis and the operation method with low temperature seawater of super open rack vaporizer for liquefied natural gas / C. Qi, C. Yi, B. Wang, W. Wang, J. Xu // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 150. P. 61–69.
13. Модель тепломассопереноса в криогенных газификаторах закрытого типа / С.В. Бородкин, И.Л. Батаронов, А.В. Иванов, В.И. Рязских // Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 6. С. 714–730.
14. Моделирование и оптимизация теплообмена в криогенных газификаторах на примере газификационной установки СГУ-7КМ-У / С.В. Бородкин, И.Л. Батаронов, А.В. Иванов, В.И. Рязских // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2021. Т. 21. № 3. С. 24–30.
15. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен. Справочник. Минск: Наука и техника, 1982. 400 с.
16. Simulation of heat transfer in a flow of over-critical nitrogen and oxygen in a horizontal circular tube / S.V. Borodkin, I.L. Bataronov, A.V. Ivanov, V.I. Ryazhskikh // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1155. P. 012011.
17. Бородкин С.В., Батаронов И.Л., Иванов А.В. Аппроксимация теплофизических параметров закритических азота и кислорода // Физико-математическое моделирование систем: материалы XXII Междунар. семинара. Воронеж: ВГТУ, 2021. С. 60–69.
18. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
19. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 304 с.
20. Ljung L. System identification. Theory for the User. N.J.: PTR Prentice Hall, 1999. 511 p.
21. Установка газификационная стационарная СГУ-7КМ-У. Руководство по эксплуатации. КВ 0420.00.000РЭ. М.: ОАО «НПО Гелиймаш», 2019. 79 с.

Поступила 07.11.2021; принята к публикации 17.12.2021

#### Информация об авторах

**Бородкин Станислав Владимирович** – адъюнкт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: borodkinstanislav@yandex.ru

**Батаронов Игорь Леонидович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: i-bataronov@mail.ru

**Иванов Алексей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а)

**Ряжских Виктор Иванович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ryazhskih\_vi@mail.ru

## PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE DIFFERENTIAL MODEL OF HEAT EXCHANGE IN A GASIFIER

S.V. Borodkin<sup>1</sup>, I.L. Bataronov<sup>2</sup>, A.V. Ivanov<sup>1</sup>, V.I. Ryazhskikh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** we formulated the problem of parametric identification of the model based on measurements on the standard equipment of an industrial gasification plant on the basis of a one-dimensional differential model of heat transfer in a closed-type gasifier. The model includes an additional integral condition and a self-consistently defined movable boundary separating the icing zone of the evaporator tube. Using the method of smoothing the singularity, we developed an algorithm for iterative solution of the model equations, using the end-to-end counting method to solve the transfer equation in one iteration. We used a mixed strategy for parametric identification of the model. We determined some of the identified parameters (evaporator heat capacity, heater power, mass pump capacity, heat transfer coefficient to the environment) on the basis of specially organized measurements: heating of the evaporator without pumping supercritical fluid, gasification under conditions of thermal insulation of the evaporator body, gasification in stationary operation. We identified the remaining parameters (heat transfer coefficients to the coolant and supercritical fluid) in passive measurements with different pump capacities. We noted that due to the poor conditionality of the problem and the limited variation of coefficients, the use of regression methods in this model is ineffective. Based on the ballistic method, we developed an identification method, which consists in determining parameters by measurements with marginal performance with the construction of a functional relationship between the identified parameters, followed by verification on intermediate measurements. We tested the method on the example of a standard gasification plant SGU-7KM-U

**Key words:** gasifier, differential heat transfer model, parametric identification, mixed strategy

### References

1. Zaytsev A.V. “Cryogenics at the beginning of the XXI century”, *Scientific journal NRU ITMO. Series Refrigeration and Air Conditioning (Nauchnii jurnal NIU ITMO. Seriya “Holodil'naya tekhnika i konditionirovanie”)*, 2014, no. 1, pp. 6.
2. Borodkin S.V., Ivanov A.V. “Prospects for the development of mobile gasification plants”, *Proc. of the IV Russian Sci. and Tech. Conf.: Priorities and Actual Problems of the Development of Ground Handling Facilities for General Use (Prioritetnye napravleniya i aktual'nye problemy razvitiya sredstv nazemnogo obsluzhivaniya obshego primeneniya)*, Voronezh, 2020, pp. 5–7.
3. Petuhov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A. “Heat exchange in nuclear power plants” (“Teploobmen v yadernykh energeticheskikh ustanovkakh”), Moscow, Atomizdat, 1974, 408 p.
4. Avduevskiy V.S., Galitseyskiy B.M., Glebov G.A. “Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket and space technology” (“Osnovy teploperedachi v aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike”), Moscow, Mashinostroyeniye, 1992, 528 p.
5. Kutateladze S.S. “Heat transfer and hydrodynamic resistance” (“Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivleniye. Spravochnoe posobie”), Moscow, Energoatomizdat, 1990, 367 p.
6. Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho Y.I. “Handbook of heat transfer”, New-York, McGraw-Hill, 1998, 1501 p.
7. Marinyuk B.T. “TNT heat exchangers. Design schemes and calculation” (“Teploobmennye apparati TNT. Konstruktivnye skhemy i raschyety”), Moscow, Energoatomizdat, 200 p.
8. Hisada N., Sekiguchi M., Hisada N. “Design and analysis of open rack LNG vaporizer”, *Design and Analysis of Pressure Vessels, Heat Exchangers and Piping Components – 2004*, San Diego, 2004, vol. 477, pp. 2004-2602.
9. Jin T., Wang M., Tang K. “Simulation and performance analysis of a heat transfer tube in SuperORV”, *Cryogenics*, 2014, vol. 61, pp. 127–132.
10. Pan J., Li R., Lv T., Wu G., Deng Z. “Thermal performance calculation and analysis of heat transfer tube in super open rack vaporizer”, *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 93, pp. 27–35.
11. Pan J., Li R., Lv T., Wu G. “Thermal performance analysis of SuperORV heat transfer tube at supercritical pressure”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 29, pp. 488–496.
12. Qi C., Yi C., Wang B., Wang W., Xu J. “Thermal performance analysis and the operation method with low temperature seawater of super open rack vaporizer for liquefied natural gas”, *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 150, pp. 61–69.
13. Borodkin S.V., Bataronov I.L., Ivanov A.V., Ryazhskikh V.I. “One-dimensional model of heat and mass transfer in closed-type cryogenic gasifiers”, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies (Jurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii)*, 2021, vol. 14, no 6, pp. 714–730.
14. Borodkin S.V., Bataronov I.L., Ivanov A.V., Ryazhskikh V.I. “Modeling and optimization of heat transfer in cryogenic gasifiers: case of an SGU-7KM-U gasification unit”, *Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering (Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika)*, 2021, vol. 21, no 3, pp. 24–30.

15. Martynenko O.G., Sokovishin Yu.A. "Free-convective heat exchange" ("Svobodno-konvektivnii teploobmen. Spravochnik"), Minsk, Nauka i Tekhnika, 1982, 400 p.
16. Borodkin S.V., Bataronov I.L., Ivanov A.V., Ryazhskikh V.I. "Simulation of heat transfer in a flow of over-critical nitrogen and oxygen in a horizontal circular tube", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1155, p. 012011.
17. Borodkin S.V., Bataronov I.L., Ivanov A.V. "Approximation of thermophysical parameters of supercritical nitrogen and oxygen", *Proc. of XXII Int. Seminar: Physical and Mathematical Modeling of Systems (Fisiko-matematicheskoe modelirovanie sistem)*, VSTU, 2021, pp. 60-69.
18. Kalitkin N.N. "Numerical methods" ("Chislennyye metody"), Moscow, Nauka, 1978, 512 p.
19. Graupe D. "Identification of systems", Huntington, New-York, 1976, 304 p.
20. Ljung L. "System identification. Theory for the User", N.J., PTR Prentice Hall, 1999, 511 p.
21. "Stationary gasification plant SGU-7KM-U" ("Ustanovka gazifikatsionnaya statsionarnaya SGU-7KM-U"), user manual, KV 0420.00. 000RE, Moscow, NPO GeliyMash, 2019, 79 p.

Submitted 07.11.2021; revised 17.12.2021

#### Information about the authors

**Stanislav V. Borodkin**, adjunct, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bolshevikov str., Voronezh 398600, Russia), e-mail: borodkinstanislav@yandex.ru  
**Igor' L. Bataronov**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: i-bataronov@mail.ru  
**Aleksey V. Ivanov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bolshevikov str., Voronezh 398600, Russia),  
**Viktor I. Ryazhskikh**, Dr. Sc. (Physics and mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ryazhskih\_vi@mail.ru

## АЛГОРИТМЫ ВЫБОРА НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ РЕШЕНИИ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

В.О. Жилинский<sup>1,2</sup>, Л.Г. Гагарина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических  
измерений, г.п. Менделеево, Россия

**Аннотация:** проведен обзор методов и алгоритмов формирования рабочего созвездия навигационных космических аппаратов при решении задач определения местоположения потребителя ГНСС. Появление новых орбитальных группировок и развитие прошлых поколений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) способствует увеличению как количества навигационных аппаратов, так и навигационных радиосигналов, излучаемых каждым спутником, в связи с чем решение проблемы выбора навигационных аппаратов является важной составляющей навигационной задачи. Рассмотрены исследования, посвященные типовым алгоритмам формирования рабочего созвездия, а также современным алгоритмам, построенным с привлечением элементов теории машинного обучения. Представлена связь ошибок определения координат потребителя, погрешностей определения псевдодалейностей и пространственного расположения навигационных аппаратов и потребителя. Среди рассмотренных алгоритмов выделены три направления исследований: 1) нацеленных на поиск оптимального рабочего созвездия, обеспечивающего минимальную оценку выбранного геометрического фактора снижения точности; 2) нацеленных на поиск квазиоптимальных рабочих созвездий с целью уменьшения вычислительной сложности алгоритма ввиду большого количества видимых спутников; 3) позволяющих одновременно работать в совмещенном режиме по нескольким ГНСС. Приводятся особенности реализаций алгоритмов, их преимущества и недостатки. В заключении приведены рекомендации по изменению подхода к оценке эффективности алгоритмов, а также делается вывод о необходимости учета как геометрического расположения космических аппаратов, так и погрешности определения псевдодалейности при выборе космического аппарата в рабочее созвездие

**Ключевые слова:** навигационная задача, выбор навигационных космических аппаратов, ГЛОНАСС, рабочее созвездие

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90016

### Введение

История развития глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) началась во второй половине 20-го века и продолжается уже на протяжении более 50 лет. Системы спутниковой навигации, создаваемые преимущественно в военных целях, в настоящее время имеют множество областей гражданского применения и играют огромную роль в социально-экономической сфере. Наиболее актуальным применением ГНСС в России остается в транспортной области, включая наземный, воздушный и морской транспорт, а также в сельском хозяйстве [1]. В настоящее время помимо двух глобальных систем навигации GPS и ГЛОНАСС заканчивается развертывание орбитальных группировок китайской системы BeiDou 3-го поколения и европейской системы Galileo. Таким образом, принимая во внимание ре-

гиональные системы навигации QZSS и IRNSS, общее количество навигационных космических аппаратов (НКА), находящихся на орбитах, достигает 120 единиц. В соответствии с маской угла возвышения НКА и окружающей обстановкой, в зоне радиовидимости навигационной аппаратурой потребителя (НАП) ГНСС будет находиться 40-50 НКА различных систем. В зависимости от класса НАП, потребителю часто доступно лишь ограниченное число принимаемых навигационных систем или количество каналов для отслеживания НКА, а также существуют ситуации, когда НАП не может обработать сигналы всех принимаемых НКА, например, ввиду ограниченной пропускной способности интернет-соединения для применения дифференциальных поправок [2, 3]. В связи с этим возникают задачи выбора НКА в рабочее созвездие.

### Общий подход к выбору НКА

Основным содержанием задачи навигационно-временного определения (НВО) является нахождение вектора состояния потребителя – его пространственных координат и поправки к шкале времени потребителя [4]. Наличие измерений псевдодальностей до четырех НКА является минимальным условием для определения вектора потребителя псевдодальномерным методом, однако в общем случае необходимо найти решение переопределенной системы уравнений  $Y = GX + \varepsilon$ , например, методом наименьших квадратов [5].

Решение системы уравнений методом МНК можно представить в следующем виде:

$$X = (G^T G)^{-1} G^T Y, \quad (1)$$

где  $X$  – вектор оцениваемых параметров;

$G$  – матрица направляющих косинусов на НКА;

$Y$  – вектор разности измеренных и рассчитанных псевдодальностей.

Тогда ковариационная матрица ошибок определения вектора состояния потребителя рассчитывается согласно формуле:

$$P_X = (G^T G)^{-1} G^T P_Y G (G^T G)^{-1}, \quad (2)$$

где  $P_Y$  – ковариационная матрица ошибок определения псевдодальностей.

Обычно предполагается, что измерения некоррелированы и равновелики (т.е.  $P_Y = \sigma_y^2 I$ ), и тогда (2) принимает вид:

$$P_X = \sigma_y^2 (G^T G)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\sigma_y^2$  – дисперсия погрешности оценки псевдодальности.

Из (3) следует, что погрешность определения координат местоположения потребителя ГНСС зависит от пространственного положения НКА и потребителя. На основе этого для оценки взаимного влияния положения потребителя и НКА вводятся факторы (коэффициенты) снижения точности определения вектора состояния потребителя (DOP – dilution of precision) [6].

Различают несколько типов факторов снижения точности:

- PDOP (Position DOP) – фактор снижения точности определения пространственного положения;

- HDOP (Horizontal DOP) – фактор снижения точности определения плановых координат;

- VDOP (Vertical DOP) – фактор снижения точности определения высоты;

- TDOP (Time DOP) – фактор снижения точности определения времени;

- GDOP (Geometrical DOP) – фактор снижения точности положения и времени (геометрический фактор).

Таким образом, СКО погрешности определения координат и времени потребителя определяется выражением:

$$\sigma_x = \sigma_y GDOP, \quad (4)$$

где  $GDOP = \sqrt{\text{tr}((G^T G)^{-1})}$ ,  $\text{tr}()$  – означает след матрицы.

Введем матрицу  $Q_x$ , определенную следующим образом:

$$Q_x = (G^T G)^{-1} = \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xz} & q_{xt} \\ q_{xy} & q_{yy} & q_{yz} & q_{yt} \\ q_{xz} & q_{yz} & q_{zz} & q_{zt} \\ q_{xt} & q_{yt} & q_{zt} & q_{tt} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Тогда с учетом (5) формулы расчета основных факторов снижения точности определяются как:

$$PDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz}}. \quad (6)$$

$$TDOP = \sqrt{q_{tt}}. \quad (7)$$

$$GDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz} + q_{tt}}. \quad (8)$$

Проблемой решения задачи выбора рабочего созвездия НКА занимались еще при развертывании орбитальных группировок первых поколений ГНСС. На тот момент вопрос стоял остро из-за слишком малого количества каналов сопровождения сигналов НКА – отслеживать космические аппараты сразу нескольких систем спутниковой навигации в то время могли лишь профессиональные образцы НАП. В них были реализованы простые алгоритмы выбора НКА поскольку рассчитывались на работу с навигационной аппаратурой с малым количеством каналов – оптимальное рабочее созвездие должно состоять из четырех навигационных аппаратов и гарантировать минимальное значение геометрического фактора, например, (6) или (8).

Развитие систем спутниковой навигации, появление новых поколений ГНСС и развертывание орбитальных группировок систем Galileo и Beidou способствовало продолжению работ над решением задачи выбора НКА в рабочее созвездие – появились алгоритмы, учитывающие возможности НАП по совместной обработке сигналов нескольких ГНСС, а также алгоритмы поиска квазиоптимальных решений с целью снижения вычислительной сложности.

## Обзор ключевых алгоритмов выбора НКА

Рассмотрим далее модифицированные алгоритмы выбора НКА для малоканальных приемников и современные алгоритмы, позволяющие использовать сигналы большого количества НКА, а также работать в режиме совместного решения по нескольким ГНСС.

Самым простым и эффективным с точки зрения точности расчета геометрического фактора является полный перебор всевозможных конфигураций НКА [8]. Выбор  $k$  навигационных спутников из  $n$  видимых состоит из следующих шагов:

- формирования всех комбинаций из  $k$  НКА, таким образом общее число конфигураций –  $C_k^n = n! / (k! (n - k)!)$ ;
- вычисление геометрического фактора GDOP для каждой сформированной конфигурации;
- определение минимального значения GDOP.

Единственным достоинством алгоритма является однозначное определение минимального значения геометрического фактора. К недостаткам можно отнести высокую вычислительную сложность алгоритма, экспоненциально возрастающую при увеличении количества НКА в зоне радиовидимости.

Следующим по простоте реализации является алгоритм выбора НКА, основывающийся на угле возвышения навигационного спутника [7]. Он показывает низкую вычислительную сложность и время, а также может обеспечивать неплохие значения GDOP при условии использования НКА орбитальной группировки только одной системы навигации, поскольку включение в рабочее созвездие космических аппаратов разных орбитальных группировок увеличивает вероятность, что все выбранные навигационные спутники будут находиться вблизи зенита.

Для уменьшения трудоемкости вычисления геометрического фактора исследовались возможные варианты определения взаимного влияния геометрии созвездия и местоположения потребителя, не включающие большое количество операций умножения и инвертирования матриц, в частности, изучалась зависимость геометрического фактора и объема тетраэдра при нахождении потребителя в его центре [6].

Существует класс алгоритмов формирования рабочего созвездия, которые основываются

на максимизации объема тетраэдра [9-12]. Один из таких алгоритмов [9], использующий в расчетах модифицированную матрицу направляющих косинусов в топоцентрической (локальной) системе координат, состоит из следующих шагов:

1. Сначала выбирается первый НКА ( $S_1$ ) с самым большим углом возвышения.

2. Затем выбирается второй НКА ( $S_2$ ), таким образом, что направляющие векторы выбранных спутников образуют угол  $\theta$ , приблизительно равный 109.5 градусам.

3. Далее выбирается третий спутник ( $S_3$ ) так, чтобы максимизировать объем  $V$ :

$$V = \frac{(1-l_3)}{6} \left( \sqrt{\frac{2(1-l_2)(1+l_3)}{(1-l_2l_3-m_2m_3)^{-1}}} + |m_2n_3| \right), \quad (9)$$

где  $l_i, m_i, n_i$  – координаты единичных векторов.

$$l_2 = \cos \theta_{1,2}, \quad m_2 = \sin \theta_{1,2}, \quad l_3 = \cos \theta_{1,3}, \\ m_3 = \cos \theta_{2,3}/m_2, \quad n_3 = \theta_{2,3}.$$

4. Четвертый спутник ( $S_4$ ) выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальный объем тетраэдра, образованного  $S_1, S_2, S_3, S_4$ :

$$V = 1/6 (\mathbf{S}), \quad (10)$$

где  $\mathbf{S}$  – вектор, содержащий направляющие векторы на НКА ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ ).

Описанный алгоритм имеет невысокую вычислительную сложность и позволяет рассчитать значения GDOP, близкие к минимальным, но имеет существенный недостаток в виде использования лишь четырех НКА. В общем случае для решения навигационной задачи четырех НКА достаточно, но для обеспечения надежности и точности вычислений НВО, а также для работы алгоритмов контроля целостности навигационных сигналов необходимо большее число измерений.

В работе [13] представлен четырехшаговый алгоритм выбора НКА, основанный на максимизации объема правильного тетраэдра, который имеет меньшую вычислительную сложность. Выбор четырех НКА производится следующим образом: сначала выбирается первый НКА с наибольшим углом возвышения; затем выбирается второй НКА так, чтобы угол между выбранными НКА был максимальным; в качестве третьего НКА выбирается тот, который имеет наименьший угол до остальных опорных вершин, не включая выбранные НКА; четвертый НКА выбирается таким образом, чтобы доставить минимум GDOP (производится локальный перебор GDOP среди оставшихся НКА). Представленный алгоритм ограничен лишь четырьмя НКА, также алгоритму может потребоваться достаточно много времени для

расчета из-за последнего шага, где производится перебор GDOP.

В исследовании [14] был предложен рекурсивный метод выбора НКА. Он позволяет выбрать подмножество из  $k$  НКА среди  $n$  видимых, не накладывая ограничения на  $k$ . Метод использует «Алгоритм R» (алгоритм «двери-вертушки», revolving-door) для генерации подмножеств рабочих созвездий НКА путем удаления навигационного аппарата из предыдущего рабочего созвездия и добавления нового НКА, а также лемму об обращении матрицы для уменьшения вычислительной сложности при расчете геометрического фактора. Рекурсивный метод показывает неплохие результаты при малом  $k$ , однако не способен значительно снизить вычислительную сложность при использовании сигналов большого количества НКА.

Квазиоптимальный алгоритм представлен в [15]. В работе вводится мера «избыточности», которая основана на коллинеарности направляющих на НКА векторов. В первую очередь алгоритм рассчитывает коэффициент избыточности для каждого видимого спутника. Затем из рабочего созвездия исключается НКА с наибольшим коэффициентом избыточности. Этот процесс продолжается до тех пор, пока количество спутников в рабочем созвездии не станет равным заданному пользователем количеству. Алгоритм был разработан в первую очередь для космических аппаратов, находящихся на низкой околоземной орбите, что позволяет в большинстве случаев наблюдать НКА с малым углом возвышения. Алгоритм позволяет существенно снизить вычислительную сложность, но часто формирует неоптимальные созвездия.

Быстрый алгоритм выбора НКА [16] предлагает вычислять значения GDOP как функцию, зависящую от общего количества спутников  $k$  в рабочем созвездии и от количества спутников в зените  $p$ . На первом шаге алгоритма вычисляются углы азимута и возвышения и сортируются в порядке возрастания. Затем из предопределенной таблицы в зависимости от общего числа НКА в рабочем созвездии выбирается требуемое число ( $p$ ) НКА в зените  $S_1, \dots, S_p$ , которые добавляются в рабочее созвездие. После этого добавляется спутник  $S_{p+1}$  с наименьшим углом возвышения. Следующим шагом производится распределение оставшихся НКА в  $(k-p-1)$  групп в зависимости от угла возвышения. Затем по одному спутнику из каждой группы добавляется в рабочее созвездие. Таким

образом формируется  $(k-p-1)$  рабочих созвездий, для которых рассчитывается геометрический фактор. Среди всех рабочих созвездий определяется одно с минимальным GDOP, которое становится текущим рабочим созвездием. В ряде случаев алгоритм может приводить к неудачным конфигурациям с большими значениями геометрического фактора. Также сложность алгоритма возрастает при увеличении количества используемых НКА.

В [17] был разработан алгоритм выбора НКА как комбинация двух алгоритмов, [9] и [15]. Алгоритм позволяет выбирать небольшое число НКА в рабочее созвездие при сохранении приемлемой точности НВО. Первые четыре спутника выбираются согласно алгоритму [9] и добавляются в текущее рабочее созвездие. Дальнейшие НКА добавляются в соответствии с [15] следующим образом: для каждого невыбранного НКА рассчитывается его коэффициент избыточности как сумма косинуса двойного угла между соответствующими парами спутников; среди рассчитанных коэффициентов выбирается НКА с минимальным значением и добавляется в рабочее созвездие; этот процесс останавливается при достижении установленного пользователем количества НКА в рабочем созвездии. Алгоритм позволяет уменьшить время выбора НКА, за счёт снижения точности НВО.

Работа [18] посвящена исследованию влияния многолучевого распространения сигналов ГНСС на точность НВО. Для этого авторы обработали измерения текущих навигационных параметров для двух сценариев типичной городской застройки: 1) полученные с привлечением GNSS-имитатора, 2) полученные по сигналам реального навигационного поля. Анализ результатов измерений выявил зависимость периода изменения отношения сигнал/шум (SNR) от скорости изменения угла возвышения НКА, а также высоты его орбиты. Предложенный алгоритм основывается на использовании выявленной зависимости периодичности SNR и состоит из следующих шагов: 1) сначала исключаются спутники, которые не соответствуют установленной маске угла возвышения; 2) далее задается длительность интервала оценки и пороговое значение для СКО оценки SNR; 3) затем производится выбор: при превышении на заданном интервале СКО порогового значения, НКА не включается в рабочее созвездие, в ином случае – включается; 4) после этого каждому спутнику назначается вес в соответствии с его углом возвышения. Представленный ал-

горитм не может найти оптимальное созвездие НКА, хотя способен немного снизить вычислительную сложность, однако в первую очередь позволяет уменьшить влияние многолучевости.

Интересное исследование приведено в работе [19], где изучаются связи между углом возвышения навигационного спутника, геометрическим фактором и эквивалентной ошибкой измерения дальности (UERE). Авторы вводят ошибку оценки позиционирования (PEE) для одновременного учета влияния GDOP и UERE, которая зависит от угла возвышения НКА.

$$m = (G^T G)^{-1} G^T UERE = [m_x \ m_y \ m_z \ m_t]^T \quad (11)$$

$$PEE = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} \quad (12)$$

Основная идея алгоритма выбора НКА заключается в подборе угла возвышения таким образом, чтобы минимизировать PEE. Авторы отмечают, что зависимость PEE от угла возвышения НКА является кусочной функцией, т.е. значение PEE остается неизменным для небольших интервалов углов возвышения, и предлагают упрощенный алгоритм, который состоит из следующих шагов:

1. Пользователь определяет маску угла возвышения и процент используемых спутников из числа видимых. Навигационные аппараты, с углом возвышения ниже заданного, исключаются.

2. Если число оставшихся спутников больше числа необходимых в решении, они распределяются в три интервала в соответствии с углом возвышения - < 45°; 45°-70°; 70°-90°.

3. Для НКА, попадающих в первый интервал, производится попарное сравнение углов возвышения и выбираются НКА, с наибольшей разностью углов. Из второго интервала выбираются НКА с наименьшей разностью углов возвышения и меньшим значением UERE. Из третьего интервала в рабочее созвездие включаются все спутники.

4. Производится проверка, что общее количество НКА не превышает заданного, лишние спутники удаляются и формируется итоговое рабочее созвездие.

К недостаткам работы алгоритма можно отнести необходимость проведения дополнительной процедуры определения порогового значения угла возвышения и ручной ввод пользователем процента используемых спутников среди видимых. Результаты апробации показали способность алгоритма снизить ошибку определения координат потребителя за счет одновременного учета как пространственного

положения навигационных аппаратов, так и эквивалентной ошибки определения псевдодальности.

Статья [20] посвящена построению алгоритма выбора НКА, основанного на исследовании изменения конфигурации рабочего созвездия во времени и оценке минимального значения геометрического фактора. В своей работе авторы исследовали как меняется состав НКА рабочего созвездия из семи НКА в течение суток и обнаружили, что оптимальное рабочее созвездие на протяжении некоторого интервала остается неизменным, а его состав обычно меняется в количестве 1-2 НКА. Таким образом получается, что 95% времени рабочее созвездие состоит из тех же НКА, что и на предыдущую эпоху (88%), либо отличается одним спутником (7%) – с малым углом возвышения, который только появляется в зоне радиовидимости, либо практически покидающий её. Оставшиеся 5% времени наблюдается ситуация, когда происходит смена двух или трёх НКА. На основании изложенного авторы предлагают три алгоритма.

Алгоритм №1 состоит из двух этапов, в зависимости от количества спутников, находящихся в зоне видимости на прошлую эпоху.

1.  $N$  – общее количество видимых спутников, все  $m$  НКА с прошлой эпохи в зоне радиовидимости:

a. Перерасчет геометрического фактора для выбранных спутников с прошлой эпохи.

b. Каждый НКА исключается из рабочего созвездия и заменяется на каждый из оставшихся видимых ( $n-m$ ) спутников, и рассчитывается GDOP.

c. Среди всех рассчитанных GDOP выбирается комбинация космических аппаратов с минимальным значением.

2. Если в зоне радиовидимости не наблюдаются прошлые  $p$  НКА ( $0 < p \leq m$ ):

a. Рассчитать GDOP для  $\binom{n-m}{p}$  комбинаций, где  $p$  НКА заменены неиспользуемыми НКА.

b. Комбинации космических аппаратов с минимальным значением GDOP добавляются к множеству рабочих созвездий.

c. Для каждого НКА в добавленном рабочем созвездии рассчитывается GDOP комбинации, если произвести в нем замену одного НКА среди неиспользуемых ( $n-m-p$ ).

d. Среди GDOP для рассчитанных комбинаций спутников выбирается созвездие с минимальным значением.

Предполагалось, что алгоритм сможет отслеживать оптимальное рабочее созвездие 95% времени, но необходимость подстройки при смене НКА занимает несколько эпох. В связи с этим авторы модифицировали алгоритм – в шагах 1.б) и 2.с) используются пары спутников. Третий вариант алгоритма подразумевает введение дополнительного шага, где формируются комбинации НКА в предположении замены одного НКА среди оставшихся видимых. Все три алгоритма позволяют значительно снизить время поиска текущего рабочего созвездия, но проигрывают по определению минимального значения геометрического фактора, при сравнении с алгоритмом полного перебора.

В работе [21] исследуется возможность выбора НКА в условиях городской застройки при затенении радиовидимости навигационных аппаратов. Предложенный авторами алгоритм последовательного обновления рабочего созвездия основывается на идее поочередного добавления нового НКА и применении формулы Шермана-Моррисона для быстрого вычисления обратной матрицы. Алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Среди  $n$  видимых НКА либо случайным образом, либо в соответствии с их уровнем сигнал/шум, выбираются четыре спутника. Если число видимых НКА одной ГНСС менее четырех, в рабочее созвездие добавляются космические аппараты другой системы навигации (с учетом минимально необходимого числа НКА при одновременной работе нескольких ГНСС).

2. Оставшиеся  $(n-m)$  видимые спутники добавляются в текущее рабочее созвездие, размером  $(m+1)$ , которые формируют множество новых рабочих созвездий.

3. Затем рассчитывается параметр GDOP для каждого добавленного на шаге 2 созвездия. После этого определяется рабочее созвездие с минимальным значением GDOP, которое становится текущим рабочим.

4. Шаги 2-4 повторяются до тех пор, пока не будет сформировано созвездие, размером  $M$ , который задается пользователем.

Тестирование работы описанного алгоритма для различных вариантов препятствий на пути распространения ГНСС сигналов показало его способность к формированию рабочего созвездия с гораздо меньшим значением геометрического фактора по сравнению со значением геометрического фактора для созвездий, построенных типовыми алгоритмами выбора НКА, которые не учитывают наличие препятствий.

Работа [22] вводит расширенный коэффициент снижения точности для использования в режиме работы по сигналам нескольких систем спутниковой навигации – MW Dop (Multi-GNSS Weighted Dop), определяемый следующим образом:

$$MW Dop = (G^T W_{N \times N} G)^{-1} G^T, \quad (13)$$

$$W_{N \times N} = \begin{bmatrix} W_1^S & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_2^S & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_N^S \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$W_i = \left( \frac{P_i^S}{\sigma_{URE}^2} \right)^{-1} = \left( \frac{\sigma_{URE}^2}{P_i^S} \right),$$

где  $N$  – количество ГНСС,  $P_i^S$  – ковариационная матрица ошибок определения псевдодальностей  $i$ -й ГНСС,  $\sigma_{URE}$  – СКО эквивалентной ошибкой измерения дальности.

Ковариационная матрица ошибок определения псевдодальностей зависит от угла возвышения НКА и имеет следующий вид:

$$P_i^S = \{\sigma_{URE}^2 + f(\theta)\}^S = \{\sigma_{90^\circ}^2 + f(\theta)\}^S, \quad (15)$$

где  $\theta$  – угол возвышения НКА,  $f(\theta)$  – гауссова функция ошибки определения псевдодальности, зависящая от угла  $\theta$ .

Таким образом, расширенный коэффициент снижения точности MW Dop учитывает ошибки определения псевдодальности в зависимости от угла возвышения НКА и типа ГНСС. Коэффициенты гауссовой функции подобраны авторами на основе суточных данных измерений для четырех типов ГНСС: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou. Сам алгоритм выбора НКА строится на показателе «чувствительности», который определяется как отношение разности между коэффициентом MW Dop, рассчитанного для рабочего созвездия после исключения нескольких НКА, и MW Dop для всех видимых НКА, к коэффициенту MW Dop для всех видимых НКА. Алгоритм способен снизить погрешность определения координат в плане (горизонтальную ошибку), но опирается только на зависимость от угла возвышения, что не всегда позволяет получать оптимальные результаты.

Статья [24] посвящена оценке минимально достижимого значения геометрического фактора. В ранней работе этих авторов [23] данная оценка была представлена как функция, зависящая только от количества видимых НКА, а получаемая оценка была гораздо больше действительной. В новом исследовании авторы получили более точную оценку, используя уг-

лы возвышения НКА и элементы матрицы  $Q$  в локальной системе координат (16), имеющей вид:

$$Q_{ENU} = \begin{bmatrix} e_1 & n_1 & u_1 & 1 \\ e_2 & n_2 & u_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_m & n_m & u_m & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Оценка минимально достижимого значения геометрического фактора определяется следующим выражением:

$$B(m, \epsilon, \widehat{d}_m) = \frac{1}{\sqrt{m}} \sqrt{\frac{4}{1-d_m} + \frac{1+d_m}{d_m-(d_m+\epsilon)^2}}, \quad (17)$$

$$GDOP \geq B(m, \epsilon, \widehat{d}_m),$$

где  $m$  – количество НКА в рабочем созвездии,  $\widehat{d}_m$  – параметр  $d_m$ , доставляющий минимум оценке  $B(m, \epsilon, \widehat{d}_m)$ ;  $d_m = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m u_k^2$ ;  $\epsilon = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m u_k - d_m$ .

Результаты экспериментов показали, что минимальное значение геометрического фактора в худшем случае не превышает 10 % от действительного. Представленная оценка позволяет контролировать процесс формирования рабочего созвездия, в том числе реализуемого методом полного перебора. Так, для текущего рабочего созвездия сначала рассчитывается оценка  $B$ , затем производится перебор НКА, и если одно из найденных значений GDOP незначительно отличается от оценки  $B$ , то дальнейший перебор комбинаций нецелесообразен.

### Обзор эвристических алгоритмов выбора НКА

Отдельно стоит выделить группу алгоритмов выбора НКА, основанных на эвристическом подходе. Хотя первые попытки его применения были предприняты достаточно давно [25], активное его развитие наблюдалось лишь последнее десятилетие. В основном в этих работах поиск рабочего созвездия представляется как задача комбинаторной оптимизации, а акцент в алгоритмах делается на аппроксимацию геометрического фактора и поиска минимума различными видами эвристических алгоритмов.

В статье [26] приводится исследование применения в задаче выбора НКА в рабочем созвездии трех типов эволюционных алгоритмов – генетического алгоритма, метода имитации отжига и метода роя частиц. Основная идея работы основывается на представлении геомет-

рического фактора через собственные числа  $\lambda_i$  матрицы  $Q_x$  (6):

$$Q_x = \sqrt{\lambda_1^{-1} + \lambda_2^{-1} + \lambda_3^{-1} + \lambda_4^{-1}} \quad (18)$$

и дальнейшей аппроксимации при помощи выражений (19) - (22):

$$x_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = \text{tr}(G^T G) \quad (19)$$

$$x_2 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 + \lambda_4^2 = \text{tr}((G^T G)^2), \quad (20)$$

$$x_3 = \lambda_1^3 + \lambda_2^3 + \lambda_3^3 + \lambda_4^3 = \text{tr}((G^T G)^3), \quad (21)$$

$$x_4 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 = \text{det}(G^T G). \quad (22)$$

Во всех алгоритмах используемая одинаковая функция приспособленности – сумма квадратов отклонений, которая имеет следующий вид:

$$J(W) = \sum e^2 = \sum (d - \sum_{i=1}^4 w_i x_i)^2, \quad (23)$$

где  $d$  – прогнозируемое значение.

В генетическом алгоритме множество рабочих созвездий представляется битовой строкой, размер которой равен количеству видимых спутников, а значения принимают: 1, если НКА включен в рабочее созвездие, и 0, если не включен. Одно рабочее созвездие представляет одну особь в популяции. Поиск оптимального рабочего созвездия осуществляется применением механизмов селекции, скрещивания и мутации. Поиск решения останавливается при достижении установленного числа смены поколений.

В алгоритме имитации отжига в качестве целевой функции также выступает функция приспособляемости, а функция изменения температуры ( $T$ ) с течением времени ( $k$ ) имеет вид:

$$T(k) = \frac{T(k-1)}{1-s}, \quad (24)$$

где  $s$  – скорость охлаждения.

В методе роя частиц рабочее созвездие представлено одной частицей, которая имеет координаты и скорость. Для каждого последующего поколения частиц вычисляются их новые координаты и скорость, и определяется частица, которая находит более выгодное положение в пространстве поиска, а все частицы роя перемещаются в её сторону.

Моделирование работы алгоритмов по результатам 400 тестов показало, что СКО разности рассчитанного значения геометрического фактора методом полного перебора и одним из трёх алгоритмов составляет 1.18, 1.19 и 1.12 соответственно. Данные алгоритмы позволяют получить приближенные оценки геометрического фактора, однако представленные в работе результаты основаны на измерениях, полученных с применением имитатора сигналов ГНСС, и требуют дальнейших исследований.

Работа [27] посвящена вопросу классификации значений геометрического фактора с помощью нейронных сетей. Диапазон значений геометрического фактора для каждого класса следующий: №1 – [1, 1.5], №2 – [2, 3], №3 – [4, 6], №4 – [7, 8], №5 – [9, 20], №6 – [21, 50]. В качестве алгоритмов обучения в работе используются: стандартный метод обратного распространения, модифицированный метод обратного распространения с возможностью регулировки скорости обучения, четыре варианта метода сопряженных градиентов (метод масштабируемых сопряженных градиентов, Fletcher-Reeves, Polak–Ribikre, Powell–Beale) и метод упругого обратного распространения. Классификация производится в соответствии с (19)–(23). В работе также определялись параметры обучения и архитектуры нейронных сетей, в т.ч. количество нейронов в скрытом слое и количество итераций обучения. Среди представленных в исследовании алгоритмов обучения наибольшую точность классификации показал метод упругого обратного распространения с одним скрытым слоем и 80 нейронами – 98.02%. Хотя, в отличие от метода обратного распространения ошибки, метод упругого распространения требует большего времени для обучения нейронной сети, в то же время он показывает большую точность классификации. Несмотря на возможности нейронных сетей, широкие границы значений геометрического фактора разных классов накладывают ограничения на возможности применения алгоритма.

Статья [28] продолжает исследования [26], где, помимо представленных алгоритмов, используется алгоритм пчелиной колонии. Также в данной работе применяется иной подход к решению проблемы – вместо аппроксимации значения геометрического фактора алгоритм группирует  $n$  НКА на  $K$  групп (кластеры), а затем производит выбор спутников в рабочее созвездие. На первом шаге кластеризации сначала выбирается число кластеров  $K$  и случайным образом формируются начальные значения принадлежности кластеру для  $R$  рабочих созвездий из  $n$  спутников. Затем для каждого рабочего созвездия формируется матрица весов  $w_{ij}$  размером  $N \times K$ , элементы которой определяются следующим образом:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если НКА принадлежит классу } j; \\ 0, & \text{в случае, если не принадлежит;} \end{cases} \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^K w_{ij} = 1; i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, K, \quad (26)$$

Выражение (26) устанавливает условие принадлежности НКА лишь одному кластеру,

таким образом, сумма столбцов матрицы  $W = [w_{ij}]$  не может превышать единицу.

Следующим шагом определяется матрица центра кластеров  $M$  размером  $K \times n$  ( $n$  – количество признаков кластера), элементы которой определяются в соответствии с выражением (27).

$$m_{jv} = \frac{\sum_{i=1}^N w_{ij} x_{iv}}{\sum_{i=1}^N w_{ij}}; j = 1, \dots, K, v = 1, \dots, n, \quad (27)$$

где  $x_{iv}$  – значение  $v$ -го признака  $i$ -го элемента кластера,  $m_{jv}$  – центр масс  $v$ -го признака  $j$ -го кластера.

В качестве целевой функции выступает сумма разности квадратов расстояний между элементами каждого кластера и центром кластера (28):

$$\min F(W, M) = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{v=1}^n f, \quad (28)$$

где  $f = w_{ij} \|x_{iv} - m_{jv}\|^2$ .

Для минимизации функции приспособленности используются четыре разных эвристических алгоритма: метод имитации отжига, генетический алгоритм, метод роя частиц и алгоритм пчелиной колонии. Настройка параметров алгоритмов производилась по данным имитации, затем проводились эксперименты по измерениям сигналов реального навигационного поля. Среди рассматриваемых эвристических алгоритмов наибольшую точность смог показать алгоритм пчелиной колонии – 99.86%. В отличие от алгоритма классификации (с точностью классификации 99.31%), основанного на нейронной сети с обратным распространением ошибки, ему не требуется время на обучение. Недостатки алгоритма такие же, как и у [27].

В [29] проводится исследование работы алгоритма выбора НКА при совместной работе двух орбитальных группировок – глобальной системы навигации GPS и региональной системы навигации IRNSS, реализуемой Индией. Отличительной особенностью IRNSS является использование двух геосинхронных орбит для размещения НКА. Предложенный в работе подход заключается в выборе четырех спутников орбитальной группировки с помощью метода имитации отжига, аналогично представленному в [26], и выборе одного НКА орбитальной группировки IRNSS. Сформированное таким образом рабочее созвездие позволило уменьшить значение геометрического фактора примерно на 10% по сравнению со значением геометрического фактора при использовании навигационных аппаратов только системы GPS.

В [30] представлен алгоритм выбора НКА, основанный на методе роя частиц (particle

swarm optimization - PSO), при совместном использовании навигационных сигналов двух орбитальных группировок – GPS и Beidou. Метод роя частиц представляет собой метод численной оптимизации, где агенты-частицы двигаются к оптимальным решениям, обмениваясь информацией с соседними частицами. Частица в рое характеризуется  $m$  координатами в пространстве решений  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$ , где  $x_{ij}$  – видимый НКА, и скоростью  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}]$ , а также знает лучшее найденное свое решение (pbest) и лучшее решение всего роя (gbest). На протяжении работы алгоритма скорость и положение частицы меняются в соответствии с:

$$v_{im}(t+1) = wv_{im}(t) + c_1r_1(pbest_i - x_{im}(t)) + c_2r_2(gbest_i - x_{im}(t)), \quad (29)$$

$$x_{im}(t+1) = x_{im}(t) + v_{im}(t+1), \quad (30)$$

где  $i = 1, \dots, N$ ,  $w$  – коэффициент инерции,  $r_1, r_2$  – случайные числа из диапазона  $[0, \dots, 1]$ ,  $a_1, a_2$  – постоянные ускорения.

В качестве функции приспособленности выступает функция расчета пространственного геометрического фактора  $f_{t,i} = GDOP_i$ , рассчитанная для соответствующей частицы на шаге  $t$ . Предложенный алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Среди видимых НКА, выбираются навигационные спутники с углом возвышения больше 5 градусов.

2. Каждому выбранному НКА присваивается значение от 1 до  $n$ .

3. Случайным образом инициализируется начальное положение частиц.

4. Среди  $n$  видимых спутников составляются сочетания из  $n$  по  $k$  –  $C_n^k$ . Каждое сочетание представляет собой одну частицу – одно рабочее созвездие НКА.

5. Для каждой частицы рассчитывается значение функции приспособленности и определяются значения gbest и pbest.

6. До достижения критерия остановки производится смена поколений частиц – обновление скоростей частиц в соответствии с (29), а также их перемещение (30) и расчет новых значений gbest и pbest.

При исследовании работы алгоритма проявилась проблема преждевременной сходимости к локальному оптимуму для решения которой авторы использовали хаотический метод роя частиц (CPSO), позволяющий в процессе работы менять коэффициент инерции и постоянные ускорения, а также производить замену частиц популяции для поддержания разнообра-

зия (ICPSO). В сравнении с методом полного перебора, CPSO позволяет снизить время расчета в 2.85 раза, сохранив при этом приемлемый уровень точности расчета геометрического фактора – в среднем ошибка определения геометрического фактора не превышает 5%. ICPSO позволяет повысить точность определения геометрического фактора до 77.8% за счёт увеличения времени работы алгоритма – оно меньше лишь на 6% по сравнению с временем, необходимым для метода полного перебора.

В работе [31] представлен алгоритм выбора НКА, основанный на аппроксимации значений геометрического фактора с помощью метода опорных векторов (SVM-регрессия) с гауссовским ядром. Среди четырех представленных в статье подходов наибольшую точность показала аппроксимация отображения  $F_1: x_1, x_2, x_3, x_4 \rightarrow GDOP$ , где  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – входные значения, рассчитанные в соответствии с (19)-(22), и отображения  $F_2: h_1, \dots, h_{10} \rightarrow GDOP$ , где  $h_i, i = 1, \dots, 10$  – элементы верхней треугольной матрицы, полученной разложением Холецкого матрицы  $Q_x$ . В качестве оценки точности аппроксимации используется среднеквадратичная ошибка (MSE). Несмотря на то, что при обучении модель на основе  $F_1$  показала малое значение  $MSE=0.0093$ , а модель на основе  $F_2$  –  $MSE=0.76$ , на тестовой выборке большую точность показала именно первая модель с показателем  $MSE=1.65$ . В исследовании также приводятся реализации алгоритмов выбора НКА с помощью нейронной сети обратного распространения ошибки и генетического алгоритма, однако их точность не позволяет достичь точность, полученную при работе первой модели.

## Заключение

Как и к любой системе, к ГНСС предъявляются определенные требования, отличающиеся в зависимости от категории потребителя. Очень часто этими требованиями выступают высокая точность НВО и возможность работы в режиме реального времени. Конечной целью задачи формирования рабочего созвездия является выбор НКА, обеспечивающий высокую точность навигационно-временных определений, которая достигается в большинстве случаев при минимальном значении геометрического фактора, поиск которого может быть осуществлен, например, методом полного перебора всевозможных комбинаций НКА. Однако при

большом количестве навигационных аппаратов в зоне радиовидимости потребителя, что особенно актуально для многоканальной НАП, поиск оптимального созвездия может производиться достаточно долго, так что ставится вопрос обеспечения только одного из указанных требований. Таким образом возникает несоответствие между возможностями навигационной аппаратуры потребителей и предъявляемыми требованиями.

В рассмотренных исследованиях нашли свое применение разнообразные алгоритмы выбора навигационных космических аппаратов для формирования рабочего созвездия. Классические алгоритмы полагают геометрический фактор основным критерием при выборе НКА, и хотя большая группа алгоритмов руководствуется значениями геометрического фактора при непосредственном выборе многие работы представили альтернативные подходы к решению этой задачи. Одним из таких подходов является применение эвристических алгоритмов, в том числе аппарата нейронных сетей, ввиду их закономерного развития. Часть рассмотренных алгоритмов наряду с решением задачи формирования оптимального рабочего созвездия также решают задачу снижения вычислительной сложности алгоритмов выбора НКА. Таким образом, представленные алгоритмы можно условно разделить на две группы в соответствии с предъявляемыми требованиями: 1) обеспечивающие высокую точность НВО; 2) обеспечивающие работу НАП в режиме реального времени.

На основе выполненного в статье исследования подходов к решению задачи выбора НКА в рабочее созвездие и конкретных реализаций алгоритмов можно определить их общие недостатки и пути их возможного преодоления. В-первых, обзор указанных исследований показывает, что большинство работ руководствуется только геометрическим фактором, т.е. предполагается, что измерения получены в предположении равноточности и некоррелированности. Однако для получения высокоточных НВО при формировании рабочего созвездия большинство исследований предполагает необходимость учёта как геометрической конфигурации НКА, так и ошибки измерения псевдодалейностей [3-6, 8]. Во-вторых, оценка эффективности алгоритмов основывается в основном на погрешности значений геометрического фактора (например, в сравнении с значением, рассчитанным алгоритмом полного перебора комбинаций НКА), а не на погрешности определения

координат потребителя ГНСС. Поскольку конечному потребителю важна именно точность навигационно-временных определений, а не сама конфигурация используемых НКА, основной акцент при оценивании эффективности алгоритмов должен быть сделан именно на неё, т.е. алгоритмы выбора НКА и решения навигационной задачи должны работать совместно. Также некоторые исследования не привлекают измерения текущих навигационных параметров для оценки работы алгоритма, используя только синтетические данные, что требует дальнейшего подтверждения их эффективности. Наконец, при невозможности одновременного обеспечения требований потребителя перед разработчиками возникает вопрос обеспечения соответствия лишь одному из требований – либо точности НВО, либо скорости работы алгоритмов. Для решения этой проблемы в НАП можно использовать несколько алгоритмов выбора НКА в зависимости от текущей обстановки, либо возможна разработка адаптивных алгоритмов, позволяющих регулировать скорость формирования рабочего созвездия и параметры выбора НКА, либо предусмотреть возможность задавать пользовательские критерии и приоритет.

#### Литература

1. Официальный сайт госкорпорации «Роскосмос». URL: <https://www.roscosmos.ru/>.
2. Divis D.A. Handling an embarrassment of riches too many satellites, Inside GNSS, Oct. 31, 2016. URL: <https://insidengnss.com/handling-an-embarrassment-of-riches-too-many-satellites/>.
3. Walter T., Blanch J., and Kropp V. Satellite selection for multi-constellation SBAS, Proc. ION GNSS+ 2016, Portland OR, Sept. 2016. Pp. 1350–1359.
4. Перов А.И. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
5. Sanz J., Juan J. and Hernandez-Pajares M. GNSS Data Processing. Vol. I: Fundamentals and Algorithms. ESA Communications, ESTEC. TM-23/1. Noordwijk, the Netherlands. 2013. Pp. 139-144.
6. Spilker J.J. Satellite constellation and geometric dilution of precision // Global Positioning System: Theory and Applications. 1996. Vol. 1. Pp. 177-208.
7. Duangduen R., Hassan A.K. A multi-constellations satellite selection algorithm for integrated global navigation satellite systems // J. Intell. Transport. Syst. 2009. № 13 (3). Pp. 127-141.
8. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition, Artech, 2017. Pp. 662-676.
9. Kihara M., Okada T. A Satellite Selection Method and Accuracy for the Global Positioning System, Journal of the Institute of Navigation. 1984. Vol. 31. № 1. Pp. 8–20.
10. Kong J., Mao X., Li S. BDS/GPS satellite selection algorithm based on polyhedron volumetric method //

IEEE/SICE international symposium on system integration. Japan, 2014. Pp. 340–345.

11. Blanco-Delgado N., Duarte Nunes F. Seco-Granados G. On the relation between GDOP and the volume described by the user-to-satellite unit vectors for GNSS positioning // *GPS Solut.* 2017. Vol. 21(3). Pp. 1139–1147.

12. Yuan S., Zhuo N. Method of selecting GPS satellites and its test analysis // *Chinese Inertial Technol.* 2008. Vol. 16(4). Pp. 445–447.

13. Li J., Ndili A., Ward L. Saps Buchman. GPS Receiver Satellite // *Antenna Selection Algorithm for the Stanford Gravity Probe B Relativity Mission*, 1999. Pp. 541–550.

14. Phatak M. Recursive Method for Optimum GPS Satellite Selection // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2001. Vol. 37. № 2. Pp. 751–754.

15. Park C., How J. Quasi-optimal Satellite Selection Algorithm for Real-time Applications // *Proceedings of the Satellite Division Technical Meeting, ION GPS 2001, Salt Lake City, UT*, 2001. Pp. 3018–3028.

16. Zhang M., Zhang J. A Fast Satellite Selection Algorithm: Beyond Four Satellites // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2009. Vol. 3. № 5. Pp. 740–747.

17. Roongpiboonsopit D., Karimi H. A Multi-Constellations Satellite Selection Algorithm for Integrated Global Navigation Satellite Systems // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2009. Vol. 13. № 3. Pp. 127–141.

18. A GNSS Satellite Selection Method Based on SNR Fluctuation / Y.Y. Fang, H. Yuan, O.G. Zhou, W. Liang // *Multipath Environments. Int. J. Control. Autom.* 2015. 8. Pp. 313–324.

19. A New Approach of Satellite Selection for Multi-constellation Integrated Navigation System / Li G., J. Wu, W. Liu, C. Zhao // *China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings: Volume III. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore: Springer, 2016. Vol. III. Pp. 359–371.

20. A temporal algorithm for satellite subset selection in multi-constellation GNSS / P. F. Swaszek, R. J. Hartnett, K. C. Seals, R. M. A. Swaszek // *Proc. ION ITM, Monterrey CA*. Jan. 2017. Pp. 1147–1159.

21. Peng G., Ou, Li G. Fast satellite selection method for multi-constellation Global Navigation Satellite System under obstacle environments // *IET Radar Sonar Navig.* 2014. Vol. 8. № 9. Pp. 1051–1058.

22. Kim H.P., Janq J.H., Park J.P. Satellite selection method according to signal levels of multi-constellation GNSS // *Proceedings of the 31st ION GNSS+ 2018*, 2018. Pp. 3746–3752.

23. Swaszek P.F., Hartnett R.J., Seals K.C. Lower bounds on DOP // *Jour. Navigation*. 2017. Vol. 70. № 5. Pp. 1041–1061.

24. Tighter GDOP Bounds and their Use in Satellite Subset Selection / P.F. Swaszek, R.J. Hartnett, K.C. Seals, R.M. A. Swaszek // *Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019)*, Oct. 2019. Pp. 637–649.

25. D. Simon H. El-Sherief, Navigation Satellite Selection using Neural Networks // *Journal of Neurocomputing*. 1995. Vol. 7. Pp. 247–258.

26. Mosavi M.R., Divband M. Calculation of geometric dilution of precision using adaptive filtering technique based on evolutionary algorithms // *2010 international conference on electrical and control engineering*. Wuhan, China, 2010, Pp. 4842–4845. Piscataway, NJ: IEEE Press.

27. Azami H., Mosavi M., Sanej S. Classification of GPS satellites using improved back propagation training algorithms // *Wireless Personal Communications*. 2013. Vol. 21. № 2. Pp. 789–803.

28. Mosavi M.R., Shiroie M. Efficient evolutionary algorithms for GPS satellites classification // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2012. Vol. 37. № 7. Pp. 2003–2015.

29. Sekhar C.R., Dutt V.S.I., Rao G.S. GDOP estimation using Simulated Annealing for GPS and IRNSS combined constellation // *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 2016. Vol. 19. Pp. 1881–1886.

30. A New Satellite Selection Algorithm for a Multi-constellation GNSS Receiver / Wang, Ershen, Jia, Chaoying, Feng, Shaojun, Tong, Gang, He, He, Qu, Pingping, Bie, Yuxia, Wang, Chuanyun, Jiang, Yi // *Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)*. Miami, Florida. 2018. Pp. 3802–3811.

31. Chih-Hung W., Wei-Han S., Ya-Wei H. A study on GPS GDOP approximation using support-vector machines. *Instrumentation and Measurement // IEEE Transactions on*. 2011. 60(1). Pp. 137–145.

Поступила 18.10.2021; принята к публикации 21.12.2021

#### Информация об авторах

**Жилинский Владислав Олегович** – аспирант института системной и программной инженерии и информационных технологий, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1); младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (141570, Россия, Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево), e-mail: vladzhilinsky@mail.ru

**Гагарина Лариса Геннадьевна** – д-р техн. наук, профессор, директор института системной и программной инженерии и информационных технологий, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1), e-mail: incos@miee.ru

#### SATELLITE SELECTION ALGORITHMS FOR POSITIONING, NAVIGATION AND TIMING USERS

V.O. Zhilinskiy<sup>1,2</sup>, L.G. Gagarina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Federal Agency on Technical Regulating and Metrology "Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering" (FSUE "VNIIFTRI"), Mendeleev, Moscow Region, Russia

**Abstract:** the article provides an overview of methods and algorithms for forming a satellite constellation as a part of the navigation problem for the positioning, navigation and timing service. The emergence of new orbital constellations and the development of past GNSS generations increase both the number of navigation satellites and radio signals emitted by every satellite, and therefore the proper solution of satellite selection problem is an important component of the positioning, navigation and timing service. We considered the works devoted to typical algorithms of working constellation formation, as well as to modern algorithms built with the use of machine-learning theory elements. We present the relationship between user coordinates errors, pseudorange errors and the influence of spatial location of satellites and the user. Three directions of research among reviewed algorithms are outlined: 1) finding the best satellite constellation that provides the minimum geometric dilution of precision; 2) finding quasi-optimal satellite constellation in order to reduce the computational complexity of the algorithm due to the large number of visible satellites; 3) possibility to work in a combined mode using radio signals of multiple GNSS simultaneously. The article presents the features of the algorithms' implementations, their advantages and disadvantages. The conclusion presents the recommendations to change the approach to assessing the performance of the algorithms, and concludes that it is necessary to take into account both the satellite geometric configuration, and pseudorange errors when satellite constellation is being formed

**Key words:** navigation equation, navigation spacecraft selection, GLONASS, satellite constellation

**Acknowledgements:** the reported study was funded by RFBR, project number 20-37-90016

### References

1. Roscosmos, available at: <https://www.roskosmos.ru/>.
2. Divis D.A. "Handling an embarrassment of riches – too many satellites", Inside GNSS, Oct. 31, 2016, available at: <https://insidengss.com/handling-an-embarrassment-of-riches-too-many-satellites/>.
3. Walter T., Blanch J., Kropp V. "Satellite selection for multi-constellation SBAS", *Proc. ION GNSS+ 2016*, Portland OR, Sept. 2016, pp. 1350–1359.
4. Perov A.I., Kharisov V.N. eds. "GLONASS. Buiding-up and functioning principals" ("GLONASS. Printsipy postroeniya I funkcionirovaniya"), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p.
5. Sanz J., Juan J. Hernandez-Pajares M. "GNSS data processing, vol. I: fundamentals and algorithms", *ESA Communications, ESTEC. TM-23/1.*, Noordwijk, the Netherlands, 2013, pp. 139-144.
6. Spilker J.J. "Satellite constellation and geometric dilution of precision," *Global Positioning System: Theory and Applications Volume 1*, 1996, pp. 177-208.
7. Duangduen R., Hassan A.K. "A multi-constellations satellite selection algorithm for integrated global navigation satellite systems", *J. Intell. Transport. Syst.*, 2009, no. 13 (3), pp. 127-141.
8. Kaplan E., Hegarty C. "Understanding GPS/GNSS: principles and applications", Artech, 2017, pp. 662-676.
9. Kihara M., Okada T. "A satellite selection method and accuracy for the Global Positioning System", *Journal of the Institute of Navigation*, 1984, vol. 31, no. 1, pp. 8–20.
10. Kong J., Mao X., Li S., "BDS/GPS satellite selection algorithm based on polyhedron volumetric method", *2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, Tokyo, Japan, 13–15 December 2014, pp. 340–345.
11. Blanco-Delgado N., Duarte Nunes F. Seco-Granados G. "On the relation between GDOP and the volume described by the user-to-satellite unit vectors for GNSS positioning", *GPS Solut.*, 2017, vol. 21(3), pp. 1139–1147.
12. Yuan S., Zhuo N. "Method of selecting GPS satellites and its test analysis", *Chinese Inertial Technol 2008*, vol. 16(4), pp. 445–447.
13. Li, J., A. Ndili, L. Ward, Saps Buchman "GPS receiver satellite/antenna selection algorithm for the Stanford Gravity Probe B Relativity Mission", 1999, pp. 541-550.
14. Phatak M. "Recursive method for optimum GPS satellite selection", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, April 2001, vol. 37, no. 2, pp. 751–754.
15. Park C., How J. "Quasi-optimal Satellite Selection Algorithm for real-time applications", *Proc. of the Satellite Division Technical Meeting, ION GPS 2001*, Salt Lake City, UT, September 2001, pp. 3018–3028.
16. Zhang M., Zhang J. "A Fast Satellite Selection Algorithm: beyond four satellites", *IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing*, October 2009, vol. 3, no. 5, pp. 740–747.
17. Roongpiboonsopit D., Karimi H. "A multi-constellations Satellite Selection Algorithm for Integrated Global Navigation Satellite Systems", *J. of Intelligent Transportation Systems*, 2009, vol. 13, no. 3, pp. 127–141.
18. Fang Y.Y., Yuan H., Zhou O.G., Liang W. "A GNSS Satellite Selection method based on SNR fluctuation in multipath environments", *Int. J. Control. Autom.*, 2015, vol. 8, pp. 313–324.
19. Li G., Wu J., Liu W., Zhao C. "A new approach of Satellite Selection for Multi-constellation Integrated Navigation System", *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2016 Proc.*, vol. III. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, Singapore, vol. 390, pp. 359-371.
20. Swaszek P.F., Hartnett R.J., Seals K.C., Swaszek R.M.A. "A temporal algorithm for satellite subset selection in multi-constellation GNSS", *Proc. ION ITM*, Monterey CA, Jan. 2017, pp. 1147-1159.
21. Peng G.Ou, Li G. "Fast satellite selection method for multi-constellation Global Navigation Satellite System under obstacle environments", *IET Radar Sonar Navig.*, 2014, vol. 8, no. 9, pp. 1051-1058.
22. Kim H.P., Janq J.H., Park J.P. "Satellite selection method according to signal levels of multi-constellation GNSS", *Proc. of the 31st ION GNSS+ 2018*, 2018, pp.3746-3752.
23. Swaszek P.F., Hartnett R.J., Seals K.C. "Lower bounds on DOP", *Jour. Navigation*, Sept. 2017, vol. 70, no.5, pp.1041-1061.

24. Swaszek P.F., Hartnett R.J., Seals K.C., Swaszek R.M.A. "Tighter GDOP bounds and their use in Satellite Subset Selection", *Proc. of the 32nd Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019)*, Oct. 2019, pp. 637-649.
25. Simon D., El-Sherief H. "Navigation Satellite Selection using Neural Networks", *J. of Neurocomputing*, 1995, vol.7, pp. 247-258.
26. Mosavi M.R., Divband M. "Calculation of geometric dilution of precision using adaptive filtering technique based on evolutionary algorithms", *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*, Wuhan, China, 25-27 June 2010, pp. 4842-4845.
27. Azami H., Mosavi M., Sanei S. "Classification of GPS satellites using improved back propagation training algorithms", *Wireless Personal Communications*, 2013, vol.21, no.2, p.789-803.
28. Mosavi M.R., Shiroie M. "Efficient evolutionary algorithms for GPS satellites classification", *Arabian J. for Science and Engineering*, 2012, vol. 37, no.7, pp.2003-2015.
29. Sekhar C.R., Dutt V.S.I., Rao G.S. "GDOP estimation using Simulated Annealing for GPS and IRNSS combined constellation", *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 2016, vol. 19, pp. 1881-1886.
30. Wang Ershen, Jia Chaoying, Feng Shaojun, Tong Gang, He He, Qu Pingping, Bie Yuxia, Wang Chuanyun, Jiang Yi "A new Satellite Selection Algorithm for a Multi-constellation GNSS Receiver", *Proc. of the 31st Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)*, Miami, Florida, September 2018, pp. 3802-3811.
31. Chih-Hung W., Wei-Han S., Ya-Wei H. "A study on GPS GDOP approximation using support-vector machines. Instrumentation and Measurement", *IEEE Transactions*, 2011 vol. 60(1), pp. 137-145.

Submitted 18.10.2021; revised 21.12.2021

#### Information about the authors

**Vladislav O. Zhilinskiy**, graduate student, Institute of System and Software Engineering and Computer Science, National Research University of Electronic Technology – MIET (bld. 1 Shokin square, Zelenograd 124498, Moscow, Russia); junior research, Federal Agency on Technical Regulating and Metrology "Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering" (Moscow region, Solnechnogorsky district, Mendeleev 141570, Russia), e-mail: vladzhilinsky@mail.ru

**Larisa G. Gagarina**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Director of Institute of System and Software Engineering and Computer Science, National Research University of Electronic Technology – MIET (Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd 124498, Moscow, Russia), e-mail: incos@micee.ru

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Г.В. Петрухнова, И.Р. Болдырев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлен комплекс технических средств создания для системы сбора данных. Проведена формализация процессов реализации функций контроля технического объекта. Рассматриваемая система сбора данных состоит из функционально законченных устройств, выполняющих определенные функции в контексте работы системы. Данная система, с одной стороны, может быть одним из узлов распределенной системы сбора данных, с другой стороны, может использоваться автономно. Показана актуальность создания системы. В основе разработки использован RISC микроконтроллер STM32H743VIT6, семейства ARM Cortex-M7, работающий на частоте до 400 МГц. К основным модулям системы относятся 20-входовый распределитель напряжения; модуль питания и настройки; модуль цифрового управления; модуль анализа, хранения и передачи данных в управляющий компьютер. Рассмотрен состав и назначение этих модулей. За сбор данных в рассматриваемой системе отвечает цепочка устройств: датчик – схема согласования – АЦП – микроконтроллер. Поскольку в составе системы имеются не только АЦП, но и ЦАП, то на ее базе может быть реализована система управления объектом. Выбор датчиков для снятия информации обусловлен особенностями объекта контроля. Имеется возможность в ручном режиме измерять электрические параметры контуров связи, в том числе обеспечивать проверку питания IDE и SATA-устройств. Представленная система сбора данных является средством, которое может быть использовано для автоматизации процессов контроля состояния технических объектов

**Ключевые слова:** сбор данных, технический контроль, система управления, коммутирующий разъем, регулятор напряжения, датчик, аналоговый сигнал, цифровой сигнал, АЦП, ЦАП

### Введение

Для контроля состояния технических объектов на различных этапах их жизненного цикла требуются современные инструменты сбора, хранения и анализа данных. Грамотная реализация процедур контроля технических объектов является одним из главных условий обеспечения эффективности и надежности их функционирования. На сегодняшний день широко используются следующие стратегии обслуживания оборудования [1 – 3]:

- реактивное,
- по регламенту,
- по фактическому состоянию оборудования,
- ориентированные на надежность (RCM),
- на основе оценки рисков (RBM),
- на основе экономической эффективности воздействий на оборудование (NPV) и некоторые другие [1 – 3].

Для технического контроля сложного оборудования создаются распределенные системы сбора и анализа информации. На сегодняшний день их использование актуально, эффективно и обосновано [1 – 3]. Основные

элементы таких систем: первичные датчики, системы сбора и обработки информации, системы хранения собранных данных и программные интерфейсы, удобные для работы конечных пользователей. Однако актуальными остаются и автономные системы сбора данных [4]. Такие системы используются для решения самых различных задач, обусловленных спецификой объекта контроля.

Таким образом, сбор данных актуален для функционирования разнообразных по составу и конфигурации систем контроля состоянием объекта. Для успешного решения своих профильных задач системы сбора данных должны создаваться на надежных и эффективно работающих узлах информационно-управляющих систем.

Целью данной статьи является представление архитектуры многофункциональной системы сбора данных, которая, с одной стороны, может быть одним из узлов распределенной системы сбора данных, с другой стороны, использоваться автономно. Также рассматриваемая система позволяет в ручном режиме измерять электрические параметры контуров связи. Данная система повышает осведомленность обслуживающего персонала о фактическом состоянии производственных ресурсов и эффективна не только для сбора данных, но и для

проведения контрольно-измерительных и ремонтных работ.

### Постановка задачи

Реализация функций контроля технического объекта сводится к выполнению ряда технологических операций в рамках соответствующих технологических процедур. Формализуем этот процесс.

В общем случае модель любого объекта контроля есть кортеж, представленный ниже [5]:

$$\Delta = \langle T, X, Y, Z, F, L \rangle,$$

где  $T$  – множество моментов времени, в которые наблюдается объект;  $X, Y$  – множества входных и выходных сигналов соответственно;  $Z$  – множество состояний объекта;  $F$  – оператор переходов, отражающий механизм изменения состояния объекта как реакцию объекта на внутренние и внешние возмущения;  $L$  – оператор выходов, описывающий механизм формирования выходного сигнала под воздействием внутренних и внешних возмущений.

Операторы  $F$  и  $L$  задают собой отображения (1) и (2) [5]:

$$F: T \times X \times Z \rightarrow Z, \quad (1)$$

$$L: T \times X \times Z \rightarrow Y. \quad (2)$$

Следующим этапом моделирования процедуры контроля, мероприятий создания, испытаний или эксплуатации технического объекта является постановка и решение задачи классификации, т.е. соотнесения наблюдаемого состояния технического объекта к одному из заданных классов его состояний [5]. В общем виде суть решения этой задачи заключается в отыскании отображения  $\eta$  [5], представляемого как:

$$\eta: Y \rightarrow E, \quad (3)$$

где  $E$  есть множество классов состояний объекта.

Задачу контроля можно в общем виде представить как объединение отображений (2) и (3) [5]:

$$T \times X \times Z \rightarrow Y \rightarrow E \quad (4)$$

Цель данной статьи состоит в представлении технических средств, позволяющих формализовать множества  $X$  и  $Y$ . Множества  $Z, E$ , отображения  $F, L, \eta$ , в рассматриваемой задаче, как правило, задаются техническим заданием на выполнение технологической процедуры и техническими характеристиками объекта контроля.

### Структура многофункциональной системы сбора данных для контроля состояния технических объектов

Аппаратная часть многофункциональной системы сбора данных для контроля технических объектов включает в себя ряд модулей, разделенных на две независимые группы.

К модулям группы «А» относятся наборы плат, которые являются функционально законченными устройствами, выполняющими определенные функции в контексте работы системы: модуль распределения напряжения, модуль питания и настройки. Эти модули ориентированы на взаимодействие с другой группой модулей, которая условно обозначена как «Б». Модули группы «А» работают независимо друг от друга и допускают покомпонентную точечную замену.

Модуль распределения напряжения предназначен для подачи питания на каждый модуль комплекса. Состав этого модуля:

- 20-входовый распределитель напряжения, представляющий собой решение для обеспечения питания всей системы, а также средство тестирования напряжения в рамках проведения диагностики питания;
- блок проверки IDE-устройств;
- блок проверки SATA-устройств;
- светодиодный блок готовности модулей к работе, который позволяет в режиме реального времени наблюдать состояние включения/выключения каждого модуля.

Данный модуль осуществляет распределение питания между всеми узлами системы сбора данных и позволяет проводить проверку работоспособности элементов питания, а также служит для получения отклика от подключенных активных модулей. Внешний вид и конструкция модуля спроектированы также для обеспечения проверки питания IDE и SATA-устройств, которые в рамках подключения расширений могут быть задействованы средствами системы сбора данных. Можно производить тестирование сразу обоих устройств этих типов.

На выводы 20-входового распределителя подается напряжение от 3.3В до 12В. При этом сила тока для каждой группы выводов имеет строго определенное значение и находится в диапазоне от 18А до 30А. При этом взаимное расположение и цветовая идентификация проводников распределителя полностью соответ-

ствует стандартному 20-контактному разъёму АТХ.

Модуль питания и настройки предназначен для подачи питания на модули системы сбора данных. Состав модуля:

- распределители напряжения между всеми модулями системы в диапазоне от 0В до 12В постоянного тока;
- независимые друг от друга элементы управления питанием;
- блок коммутирующих разъемов.

Модуль питания и настройки позволяет выбрать необходимый номинал напряжения и с помощью соединительных проводов обеспечить питанием тот или иной элемент на одном или нескольких модулях комплекса. Помимо основной функции подачи питания к разъемам модуля, имеется также возможность использования этого блока в качестве разветвителя. Для этой цели имеются коммутирующие разъемы на рабочей области модуля.

В состав модуля питания и настройки входит регулятор напряжения от 0 до 12В, работающий на основе переменного резистора. К особенностям использования данного блока следует отнести повышенную защиту для элементов, не рассчитанных на данный диапазон входного тока. С этой целью разъемы, на которые поступает напряжение до 12В, имеют уникальную форму. Поэтому для данного типа напряжения разработаны соответствующие соединительные проводники, позволяющие работать только с элементами данного типа разъемов.

Еще одним составляющим элементом модуля является регулятор напряжения от 0 до 5В, функционирующий на основе переменного резистора и позволяющий управлять напряжением от 0 до 5В и двумя цепями соединительных разъемов, один из которых имеет постоянное напряжение 3,3В. Для защиты элементов, не рассчитанных на диапазон 3,4-5,0В входного тока, предусмотрена цветовая маркировка разъемов.

В состав модуля входит формирователь восходящих импульсов номиналом 3,3В. В качестве основного, как наиболее распространенного в рамках реализации комплекса напряжения, принято именно напряжение равное 3,3В. Импульс именно такого номинала формируется при нажатии на соответствующий контакт модуля. Соответственно до нажатия на контакт подачи восходящего импульса

соединительные разъемы данного блока формируют логический «0».

Также в составе модуля имеется формирователь нисходящих импульсов 3,3 вольта. Аналогично формирователю восходящих импульсов данный блок модуля ориентирован на напряжение равное 3,3 вольта. Ток данного номинала до нажатия на контакт подачи нисходящего импульса поступает на соединительные разъемы данного блока. При нажатии на соответствующий контакт формируют логический «0».

Располагаемый внизу платы блок коммутирующих разъемов представлен разъемами, которые соединены в одну цепь и могут выполнять функции распределителя напряжения между всеми контактами, подключенными к ним. Следует учесть, что распределение напряжения допустимо в пределах до 5В. Однако, на определенных правах доступа к элементам комплекса, возможно и распределение напряжения большего номинала.

Группа «Б» состоит из следующих модулей:

- модуль цифрового управления;
- модуль хранения, анализа данных и передачи их в управляющий компьютер.

Каждый из этих модулей является функционально законченным устройством и представляет собой плату.

Ядром модулей группы «Б» является модуль центрального управления. Он предназначен для осуществления управления выбранными элементами (подключенными устройствами) с помощью микроконтроллера STM32H743VIT6. Этот модуль является основой многофункциональной системы сбора данных. Каждый блок группы «Б» представляет собой отдельную функциональную часть системы.

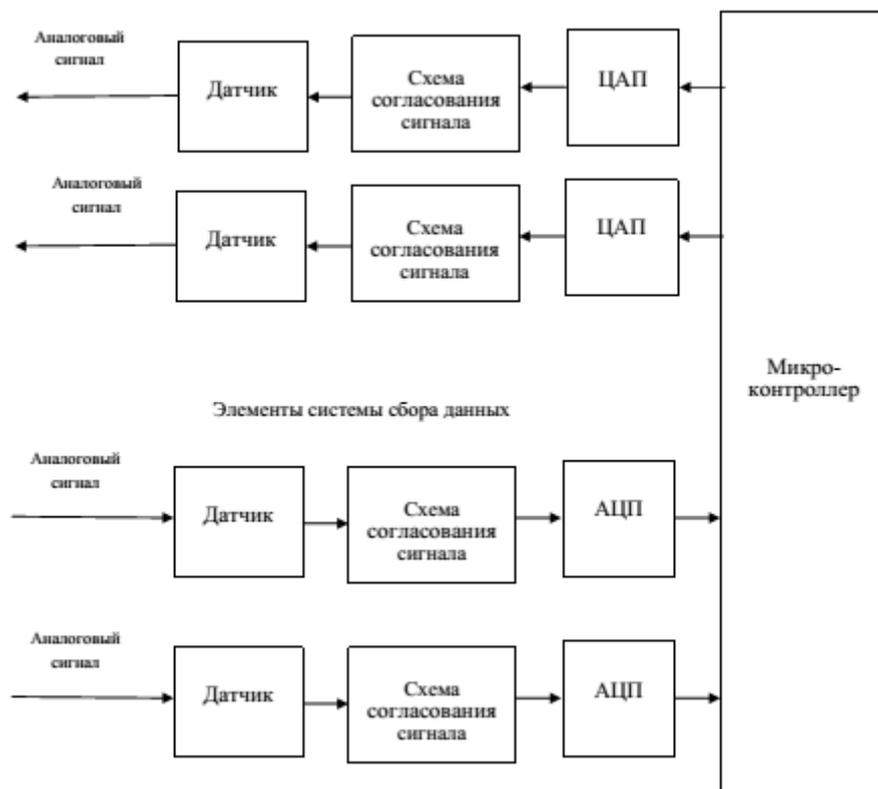
На модуль цифрового управления поступает аналоговый сигнал, который должен быть обработан в цифровом виде. При помощи датчика реализуется измерение аналогового сигнала и преобразование его в зависимость напряжения или тока от времени. Полученная зависимость через схему согласования сигнала поступает на вход АЦП, осуществляющего ее преобразование в цифровой код. С выхода АЦП данные поступают на центральное звено блока – микроконтроллер STM32H743VIT6, который функционирует на основе записанной в него управляющей программы.

На базе этого модуля может быть реализована система управления объектом, поскольку

в составе модуля имеются ЦАП и средства обратной связи с объектом. Микроконтроллер оценивает текущее значение аналогового сигнала и на основании заложенной программы выдает управляющее воздействие. Управляющее воздействие преобразовывается в напря-

жение или ток, подаваемый на схему управления, при помощи ЦАП.

За сбор данных в рассматриваемом модуле системы отвечает цепочка устройств: датчик – схема согласования – АЦП – микроконтроллер. Структура модуля центрального управления представлена на рисунке.



Структура модуля цифрового управления

В состав модуля цифрового управления входят следующие устройства:

- 32-битный RISC микроконтроллер STM32H743VIT6, семейства ARM Cortex-M7, работающий на частоте до 400 МГц;

- два 16-разрядных АЦП MCP33131D-110-E/MS;

- два измерительных усилителя ADA4254ACPZ-R7;

- два аналоговых мультиплексора DG409LEDQ-T1-GE3;

- два 16-битных ЦАП DAC8552IDGKT;

- два операционных усилителя TLV9002IDGKR.

Сама система сбора данных состоит из микроконтроллера и элементов, представленных в нижней части рисунка: двух АЦП, двух схем согласования и датчиков для снятия ин-

формации. Выбор датчиков обусловлен особенностями объекта контроля.

Многофункциональная система сбора данных о состоянии объекта контроля представляет собой установку, объединяющую в своем составе платы, реализующие рассмотренные ранее модули. Платы, входящие в группу «Б», являются съемными. Их замена происходит при модификации и модернизации системы. Рассмотренная многофункциональная система сбора данных может быть использована для решения задач автоматизации процессов контроля состояний технических объектов.

### Заключение

Современные инструменты сбора, хранения и анализа данных актуальны для реализации процедур контроля технических объектов.

Представленная в статье система предназначена для сбора информации о состоянии объекта контроля. Проведена формализация процедур контроля технических объектов и выделены множества, для формирования которых разработаны технические средства.

В представленной статье проведен анализ структуры созданной системы сбора данных, выделены основные технологические модули и описано их назначение. За сбор данных в рассматриваемой системе отвечает функциональная цепочка устройств: датчик – схема согласования – АЦП – микроконтроллер. Имеется возможность построения автоматизированной системы управления. Выбор датчиков для считывания информации обусловлен особенностями объекта контроля и условиями решаемой задачи.

Представленная система позволяет в ручном режиме измерять электрические параметры контуров связи. В систему также заложены возможности для обеспечения проверки питания IDE и SATA-устройств, которые в рамках подключения расширений могут быть задействованы средствами технологического процесса.

Данная система является эффективным средством для автоматизации процессов контроля состояния технических объектов. Она может использоваться как стационарно, так и в

рамках распределенной автоматизированной системы.

В процессе эксплуатации разработанная система позволит повысить осведомленность обслуживающего персонала о фактическом состоянии производственных ресурсов и будет эффективна не только для сбора данных, но и для проведения контрольно-измерительных и ремонтных работ.

#### Литература

1. Фрейман В. И. К вопросу проектирования и реализации элементов и устройств распределенных информационно-управляющих систем // Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 30. С. 28-49.
2. Freyman V., Posyagin A. The soft decoding of control systems elements test diagnostics results // Proceedings of 2017 XX IEEE international conference on soft computing and measurements (SCM). 2017. P. 329-332. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970576
3. Яблоков А.Е., Федоренко Б.Н., Латышев М.А. Технический мониторинг, диагностика и защита оборудования // Комбикорма. 2018. № 6. С. 32-34.
4. Современное состояние процессов автоматизации измерения и контроля / Р.Т. Шабданбаева, Ж.Ж. Жанысбекова, Ж.Н. Исабеков, А.В. Шумаков // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. 2017. Вып. 103. № 4. С. 257-264.
5. Байкин В.А., Стецюк А.Н. Формализация технологических процедур контроля жизненного цикла сложной инженерно-технической системы // Программные системы и вычислительные методы. 2016. № 1(10). С. 52-58. DOI: 10.7256/2305-6061.2015.1.14407

Поступила 10.11.2021; принята к публикации 17.12.2021

#### Информация об авторах

**Петрухнова Галина Викторовна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: gypetruhnova@mail.ru

**Болдырев Илья Романович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: iliya.boldyreff@yandex.ru

### MULTIFUNCTIONAL DATA COLLECTION SYSTEM FOR MONITORING THE STATE OF TECHNICAL FACILITIES

G.V. Petrukhнова, I.R. Boldyrev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** we present a set of technical means for creating a data collection system. We carried out the formalization of the processes of implementing the control functions of a technical object. The multifunctional data collection system consists of functionally complete devices that perform certain functions in the context of the system operation. This system, on the one hand, can be one of the nodes of a distributed data collection system, on the other hand, it can be used autonomously. We show the relevance of the system creation. The development is based on the RISC microcontroller STM32H743VIT6, ARM Cortex-M7 family, operating at a frequency of up to 400 MHz. The main modules of the system include: a 20-input voltage distributor; a power supply and settings module; a digital control module; a module for analyzing, storing and transmitting data to a control computer. We considered the composition and purpose of these modules. A chain of devices is responsible for data collection in the system under consideration: sensor – matching circuit – ADC – microcontroller. Since the system includes not only an ADC but also a DAC, an object management system can be implemented on its basis. The choice of sensors for taking information is due to the characteristics of the object of control. It is possible to manually measure the electrical parameters of the communication circuits, including checking the

power supply of IDE and SATA devices. The presented data collection system is a tool that can be used to automate the processes of monitoring the condition of technical facilities

**Key words:** data collection, technical control, control system, switching connector, voltage regulator, sensor, analog signal, digital signal, ADC, DAC

#### References

1. Freyman V.I. "On the issue of design and implementation of elements and devices of distributed information-control systems", *Electrical Engineering, Information Technologies, Control Systems (Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya)*, 2019, no.30, pp. 28-49.
2. Freyman V.I., Bezukladnikov I.I. "The application of soft decision making on decoding and assessment of test diagnosing results within control systems elements", *Proc. of 2017 XX IEEE Int. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2017, pp. 124-128. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970515.
3. Yablokov A.E., Fedorenko B.N., Latyshev M.A. "Technical monitoring, diagnostics and equipment protection", *Compound Feed (Kombikorma)*, 2018, no. 6, pp. 32-34.
4. Shabdanbaeva R.T., Zhanyzbekova Zh.Zh., Isabekov Zh.N., Shumakov A.V. "Current state of the processes of automation of measurement and control", *Bulletin of Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev (Vestnik Kazakhskoy akademii transporta i kommunikatsiy imeni M. Tynyshpaeva)*, 2017, issue 103, no. 4, pp. 257-264.
5. Baykin V.A., Stetsyuk A.N. "Formalization of technological procedures for monitoring the life cycle of a complex engineering system", *Software Systems and Computational Methods (Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody)*, 2016, no. 1(10), pp. 52-58. DOI: 10.7256/2305.

Submitted 10.11.2021; revised 17.12.2021

#### Information about the authors

**Galina V. Petrukhnova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: gvpetrukhnova@mail.ru

**Il'ya R. Boldyrev**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: iliya.boldyreff@yandex.ru

## СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ОКРЕСТНОСТИ АЭРОДРОМА

Д.А. Смирнов<sup>1</sup>, В.Г. Бондарев<sup>2</sup>, А.В. Николенко<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Войсковая часть 15650, г. Ахтубинск, Россия

<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрены вопросы разработки системы, способной обеспечивать автоматическую навигацию беспилотного летательного аппарата в окрестности аэродрома без использования дополнительных датчиков. Рассмотрен алгоритм решения этой задачи с использованием бортовой монокулярной системы технического зрения, функционирующей в диапазоне 1,55 мкм. Для обеспечения навигации беспилотный летательный аппарат оснащен системой информационного обмена, а в районе точки взлета-посадки в качестве наземных источников (маяков) предложено использовать полупроводниковые лазеры с некогерентным излучением длиной волны 1,55 мкм, которые обеспечивают работу системы в простых метеоусловиях. Путем измерений угла азимута в двух точках траектории движения беспилотного летательного аппарата вычисляются его координаты местоположения относительно взлетно-посадочной полосы, а также угол курса необходимый для выхода в начальную точку глиссады снижения. Ввиду того, что погрешности измерений обусловлены ошибками измерений угла азимута, курса и скорости полета, ошибками измерения временных интервалов в данной работе пренебрегаем. Полученные графики показывают, что погрешности измерения координат беспилотного летательного аппарата минимальны при пролете напротив маяка и резко возрастают при удалении от него, что обусловлено погрешностью измерения азимута и дальности. При этом измерение местоположения беспилотного летательного аппарата необходимо выполнять на минимальном удалении от маяка

**Ключевые слова:** навигация, беспилотный летательный аппарат, окрестности аэродрома, полупроводниковые лазеры, система технического зрения, лазерные маяки

### Введение

Одним из приоритетных направлений повышения эффективности применения войск в настоящее время считается оснащение Вооруженных сил беспилотными летательными аппаратами (БЛА) различного назначения. Ввиду того, что БЛА в последние десятилетия постоянно применяются в спецоперациях, были определены недостатки, устранение которых является важнейшей задачей [1].

Отметим некоторые из них.

1. Ограниченный радиус действия БЛА, что определяется его привязкой к наземному пункту управления по линии командной радиосвязи.

2. Недостаточный «интеллект» бортового комплекса БЛА.

3. Отсутствие автоматических современных навигационных систем.

Решение этих проблем видится в развитии методов видеонавигации и создания систем военного назначения БЛА, что позволяет решить множество задач автоматизации полета и сни-

зить остроту перечисленных проблем [2-3]. Составной частью средств навигации может являться система технического зрения [4-5].

Актуальным направлением применения систем технического зрения (СТЗ) является решение измерительных задач обеспечивающих автоматизацию сложных этапов полета БЛА. Назовем наиболее известные задачи, решение которых в автоматическом режиме давно стало насущной необходимостью, но до сих пор не реализовано из-за отсутствия удовлетворительных средств измерения параметров местоположения БЛА. Такими задачами принято считать посадку самолетов на аэродром, посадку самолетов и вертолетов на авианосец, дозаправку топливом в воздухе, полет строем, облет препятствий, боевое применение оружия, навигацию на маршруте [6-7].

Повышение эффективности применения БЛА военного назначения, безопасности их функционирования, в том числе и в сложных погодных условиях, обеспечивается решением измерительных и навигационных задач на различных этапах движения с целью автоматизации управления полетом [8-9]. Для реализации автоматического управления необходимо су-

щественно повысить точность определения пространственного и углового положения БЛА и других объектов движения либо относительно земной поверхности, либо друг относительно друга.

Для реализации полноценного захода на посадку необходимо выполнить предпосадочный маневр и вывести БЛА в начальную точку глиссады. В настоящее время решение этой задачи обеспечивает применение исключительно радиотехнических систем [10-11]. Имеется два существенных аргумента против таких решений применительно к авиации военного применения. Первое – успешное применение средств радиотехнической борьбы (РЭБ) по подавлению радиотехнических систем навигации. Второе – применение таких систем привязывает авиацию к стационарной инфраструктуре аэродромов, лишая ее мобильности, скрытности, возможности работы со слабо оборудованных полевых аэродромов, посадочных площадок и автодорог как на своей, так и на территории противника.

### Навигация в окрестности аэродрома

Рассмотрим алгоритм решения этой задачи с использованием бортовой монокулярной СТЗ, функционирующей в диапазоне 1,55 мкм [12]. Для обеспечения навигации БЛА, оснащенного системой информационного обмена (СИО), в районе точки взлета-посадки с радиусом не менее 10 км в простых метеоусловиях предложено применение лазерного посадочного маяка (рис. 1).

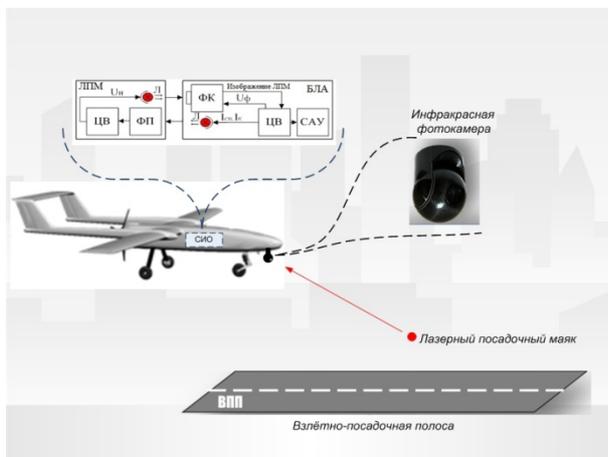


Рис. 1. Схема взаимодействия бортовой монокулярной СТЗ и системы информационного обмена с лазерным посадочным маяком

Лазерный посадочный маяк излучает импульсный сигнал в режиме запрос-ответ, что обеспечивает высокую энергетическую эффективность, помехоустойчивость и скрытность системы, а также безопасность для личного состава, обеспечивающего полеты [13]. На рис. 2 представлена структура системы информационного обмена ИК-сигналами между БЛА и лазерным посадочным маяком.

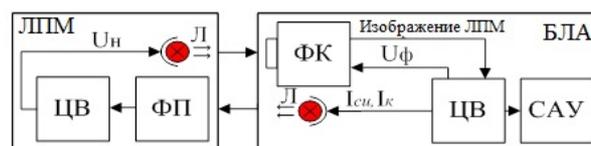


Рис. 2. Структура системы информационного обмена: ЦВ – цифровой вычислитель; ФП – фотоприемник; ФК – цифровая фотокамера; САУ – система автоматического управления; ЛПМ – лазерный посадочный маяк; Л – лазерный излучатель

Рассмотрим устройство лазерного посадочного маяка автоматического оптоэлектронного компаса (АОЭК), обеспечивающего навигацию в районе точки взлета-посадки с радиусом не менее 10 км в простых метеоусловиях (рис. 3).

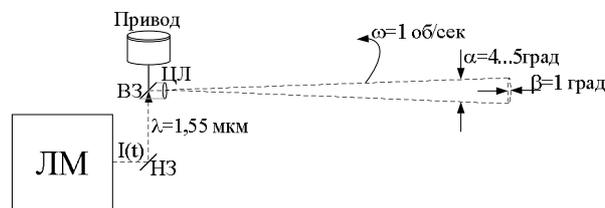


Рис. 3. Схема формирования навигационного излучения сканирующего лазерного маяка: ЛМ – лазерный маяк (1,55 мкм.), ВЗ – вращающееся зеркало, ЦЛ – цилиндрическая линза, связанная с ВЗ, НЗ – неподвижное зеркало

Пусть излучение маяка сформировано в виде узкого пучка шириной порядка 1 град и высотой порядка 4-5 град и подвергается время-импульсной модуляции в зависимости от азимутального направления излучения, тогда всенаправленный бортовой фотоприемник ИК-излучения принимает сигнал, содержащий информацию об азимуте направления на БЛА.

Формирование импульсного сигнала автоматического оптоэлектронного компаса основано на время-импульсном кодировании угла поворота зеркала. Принимая эти кодовые посылки  $I(t)$  (рис. 4) и выполняя преобразование

время-код, на каждом обороте вращающегося зеркала (ВЗ) получим цифровой сигнал об азимутальном положении БЛА в виде угла  $A_i$  ( $i$  – номер измерительной процедуры) [14].

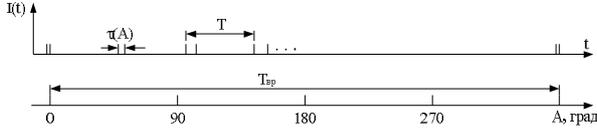


Рис. 4. Время-импульсное кодирование сигнала маяка:

- $i(A)$  – длительность кодовой посылки,
- $T$  – период следования кодовых посылок,
- $I(t)$  – временная диаграмма излучения маяка,
- $T_{сп}$  – период вращения зеркала

Решим задачу по определению местоположения БЛА в системе координат OXZ (рис. 5), при этом считаем известными угол рыскания  $\psi$ , величину скорости  $V$  и временного интервала  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ . Тогда задача сводится к определению координат точки  $O_2$  и угла рыскания на точку  $O_r$  (начало глиссады), определение которых представлено графически на рис. 5.

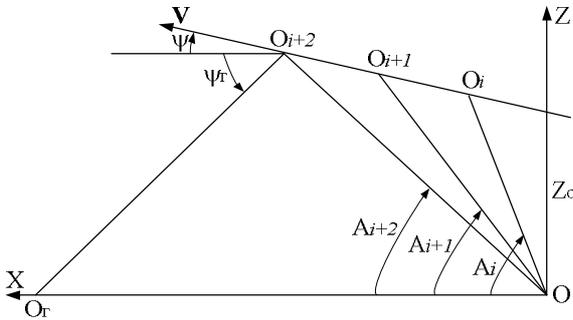


Рис. 5. Определение координат БЛА относительно ВПП:

- $Z_0$  – координата точки пересечения траектории движения БЛА с осью OZ,
- $A_i$  – угол азимута на  $i$  шаге измерения

Поскольку сканирование лучом маяка осуществляется посредством равномерного вращения с известной угловой скоростью  $\omega$ , то время и угол азимута связаны следующим образом

$$\left. \begin{aligned} A_i &= \omega \cdot t_i - 2\pi \cdot i \\ A_{i+1} &= \omega \cdot t_{i+1} - 2\pi \cdot (i+1) \\ A_{i+2} &= \omega \cdot t_{i+2} - 2\pi \cdot (i+2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

или

$$\left. \begin{aligned} t_i &= \frac{A_i}{\omega} + \frac{2\pi \cdot i}{\omega} \\ t_{i+1} &= \frac{A_{i+1}}{\omega} + \frac{2\pi \cdot (i+1)}{\omega} \\ t_{i+2} &= \frac{A_{i+2}}{\omega} + \frac{2\pi \cdot (i+2)}{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Запишем векторы  $\overline{OO_i} = \bar{i}x_i + \bar{k}z_i$ ,  $\overline{OO_{i+1}} = \bar{i}x_{i+1} + \bar{k}z_{i+1}$ , и выразим очевидные связи между их координатами

$$\frac{z_i}{x_i} = \operatorname{tg} A_i, \quad \frac{z_{i+1}}{x_{i+1}} = \operatorname{tg} A_{i+1},$$

а также их разность

$$\overline{O_{i+1}O_i} = \bar{i}(x_{i+1} - x_i) + \bar{k}(z_{i+1} - z_i).$$

Для этого вектора справедливо очевидное соотношение

$$\frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} = \operatorname{tg} \psi. \quad (3)$$

Выразим длину вектора  $\overline{O_{i+1}O_i}$

$$|\overline{O_{i+1}O_i}| = V(t_{i+1} - t_i), \quad (4)$$

Используя (1), преобразуем эти соотношения следующим образом:

$$|\overline{O_{i+1}O_i}| = V \left( \frac{A_{i+1} - A_i}{\omega} + T \right) = \frac{V}{\omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi),$$

где  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  – период вращения луча маяка.

Используя теорему синусов для треугольника  $OO_iO_{i+1}$ , запишем

$$\frac{O_iO_{i+1}}{\sin(A_i - A_{i+1})} = \frac{OO_{i+1}}{\sin(A_i - \psi)}$$

или

$$OO_{i+1} = \frac{\sin(A_i - \psi)}{\sin(A_i - A_{i+1})} \frac{V}{\omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi),$$

а выражения для координат точки  $O_{i+1}$  примут вид

$$X_{i+1} = \frac{\sin(A_i - \psi) \cos A_{i+1}}{\sin(A_i - A_{i+1})} \frac{V}{\omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi),$$

$$Z_{i+1} = \frac{\sin(A_i - \psi) \sin A_{i+1}}{\sin(A_i - A_{i+1})} \frac{V}{\omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi).$$

Применяя теорему синусов, еще раз выразим  $OO_i$

$$\frac{O_iO_{i+1}}{\sin(A_i - A_{i+1})} = \frac{OO_i}{\sin(A_{i+1} - \psi)},$$

откуда

$$OO_i = \frac{\sin(A_{i+1} - \psi) V}{\sin(A_i - A_{i+1}) \omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi),$$

а выражения для координат точки  $O_i$  примут вид

$$X_i = \frac{\sin(A_{i+1} - \psi) \cos A_i V}{\sin(A_i - A_{i+1}) \omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi),$$

$$Z_i = \frac{\sin(A_{i+1} - \psi) \sin A_i V}{\sin(A_i - A_{i+1}) \omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi).$$

Уравнение траектории движения БЛА имеет вид  $Z = X \cdot \operatorname{tg} \psi + Z_0$ .

Отсюда координата точки пересечения траектории движения БЛА с осью OZ вычисляется по следующей формуле

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z_i - \operatorname{tg} \psi X_i = \frac{\sin(A_{i+1} - \psi) \sin A_i V}{\sin(A_i - A_{i+1})} (t_{i+1} - t_i) - \\ &\quad - \frac{\operatorname{tg} \psi \sin(A_{i+1} - \psi) \cos A_i V}{\sin(A_i - A_{i+1})} (t_{i+1} - t_i) = \\ &= \frac{\sin(A_{i+1} - \psi)}{\sin(A_i - A_{i+1})} V (t_{i+1} - t_i) (\sin A_i - \operatorname{tg} \psi \cos A_i). \end{aligned}$$

Координата точки пересечения траектории БЛА с осью OX выражается следующим образом

$$X_0 = -\frac{Z_0}{\operatorname{tg} \psi} = -\frac{\sin(A_{i+1} - \psi) \sin(A_i - \psi) V}{\sin(A_i - A_{i+1}) \sin \psi \omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi).$$

$$\begin{aligned} \Delta X_{i+1}^* &= \sqrt{\left(\frac{\partial X_{i+1}}{\partial A_i}\right)^2 (\Delta A^*)^2 + \left(\frac{\partial X_{i+1}}{\partial A_{i+1}}\right)^2 (\Delta A^*)^2 + \left(\frac{\partial X_{i+1}}{\partial \psi}\right)^2 (\Delta \psi^*)^2 + \left(\frac{\partial X_{i+1}}{\partial V}\right)^2 (\Delta V^*)^2}, \\ \Delta Z_{i+1}^* &= \sqrt{\left(\frac{\partial Z_{i+1}}{\partial A_i}\right)^2 (\Delta A^*)^2 + \left(\frac{\partial Z_{i+1}}{\partial A_{i+1}}\right)^2 (\Delta A^*)^2 + \left(\frac{\partial Z_{i+1}}{\partial \psi}\right)^2 (\Delta \psi^*)^2 + \left(\frac{\partial Z_{i+1}}{\partial V}\right)^2 (\Delta V^*)^2}, \end{aligned}$$

где  $\Delta A^*$ ,  $\Delta \psi^*$ ,  $\Delta V^*$  – пределы абсолютных допускаемых погрешностей измерения азимута, курса и скорости.

$$X_{i+1} = \frac{\sin(A_i - \psi) \cos A_{i+1} V}{\sin(A_i - A_{i+1}) \omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi), \quad (4)$$

$$Z_{i+1} = \frac{\sin(A_i - \psi) \sin A_{i+1} V}{\sin(A_i - A_{i+1}) \omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi). \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_{i+1}}{\partial A_i} &= \frac{V}{\omega} \cos A_{i+1} \times \\ &\times \frac{\sin(\psi - A_{i+1})(A_{i+1} - A_i + 2\pi) - \sin(A_i - \psi) \sin(A_i - A_{i+1})}{\sin^2(A_i - A_{i+1})}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_{i+1}}{\partial A_{i+1}} &= \frac{V}{\omega} \sin(A_i - \psi) \times \\ &\times \frac{(A_{i+1} - A_i + 2\pi) \cos A_i + \cos A_{i+1} \sin(A_i - A_{i+1})}{\sin^2(A_i - A_{i+1})}, \end{aligned}$$

Тогда угол курса, обеспечивающий выход в начальную точку глissады, определим следующим образом

$$\operatorname{tg} \psi_r = \frac{Z_r - Z_{i+1}}{X_r - X_{i+1}},$$

учитывая, что  $Z_r = 0$ , а также выражения для  $X_{i+1}$  и  $Z_{i+1}$ , получим

$$\psi_r = \arctan \frac{V \sin(A_i - \psi) \sin A_{i+1} (A_{i+1} - A_i + 2\pi)}{V \sin(A_i - \psi) \cos A_{i+1} (A_{i+1} - A_i + 2\pi) - X_r \omega \sin(A_i - A_{i+1})}.$$

Таким образом, путем измерений угла азимута в двух точках траектории движения БЛА могут быть вычислены его координаты местоположения относительно ВПП  $X_{i+1}$ ,  $Z_{i+1}$ , а также угол курса  $\psi_r$ , необходимый для выхода в начальную точку глissады снижения.

### Погрешности измерения координат

Будем считать, что погрешности измерений обусловлены ошибками измерений угла азимута, курса и скорости полета, ошибками измерения временных интервалов пренебрегаем.

В соответствии с методикой определения погрешностей косвенных измерений вычислим  $\Delta X_2^*$  и  $\Delta Z_2^*$

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_{i+1}}{\partial A_{i+1}} &= \frac{V}{\omega} \sin(A_i - \psi) \times \\ &\times \frac{(A_{i+1} - A_i + 2\pi) \cos A_i + \cos A_{i+1} \sin(A_i - A_{i+1})}{\sin^2(A_i - A_{i+1})}, \\ \frac{\partial X_{i+1}}{\partial V} &= \frac{A_{i+1} - A_i + 2\pi}{\omega} \frac{\sin(A_i - \psi) \cos A_{i+1}}{\sin(A_i - A_{i+1})}, \\ \frac{\partial X_{i+1}}{\partial \psi} &= -\frac{A_{i+1} - A_i + 2\pi}{\omega} V \frac{\cos(A_i - \psi) \cos A_{i+1}}{\sin(A_i - A_{i+1})}, \\ \frac{\partial Z_{i+1}}{\partial A_i} &= \frac{V \sin A_{i+1}}{\omega} \times \\ &\times \frac{\sin(\psi - A_{i+1})(A_{i+1} - A_i + 2\pi) - \sin(A_i - \psi) \sin(A_i - A_{i+1})}{\sin^2(A_i - A_{i+1})}, \\ \frac{\partial Z_{i+1}}{\partial A_{i+1}} &= \frac{V \sin(A_i - \psi)}{\omega} \times \\ &\times \frac{\sin A_i (A_{i+1} - A_i + 2\pi) - \sin(A_i - A_{i+1}) \sin A_{i+1}}{\sin^2(A_i - A_{i+1})}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial Z_{i+1}}{\partial V} = \frac{\sin(A_i - \psi) \sin A_{i+1} (A_{i+1} - A_i + 2\pi)}{\sin(A_i - A_{i+1}) \omega},$$

$$\frac{\partial Z_{i+1}}{\partial \psi} = -\frac{\cos(A_i - \psi) \sin A_{i+1} V}{\sin(A_i - A_{i+1}) \omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi),$$

Тогда

$$\Delta X_{i+1}^* = \sqrt{\left( \frac{V \cos A_{i+1} \sin(\psi - A_{i+1})(A_{i+1} - A_i + 2\pi) - \sin(A_i - \psi) \sin(A_i - A_{i+1})}{\sin^2(A_i - A_{i+1})} \right)^2 (\Delta A^*)^2 + \left( \frac{V \sin(A_i - \psi) (A_{i+1} - A_i + 2\pi) \cos A_i + \cos A_{i+1} \sin(A_i - A_{i+1})}{\sin^2(A_i - A_{i+1})} \right)^2 (\Delta A^*)^2 + \left( \frac{A_{i+1} - A_i + 2\pi}{\omega} V \frac{\cos(A_i - \psi) \cos A_{i+1}}{\sin(A_i - A_{i+1})} \right)^2 (\Delta \psi^*)^2 + \left( \frac{A_{i+1} - A_i + 2\pi}{\omega} \frac{\sin(A_i - \psi) \cos A_{i+1}}{\sin(A_i - A_{i+1})} \right)^2 (\Delta V^*)^2}$$

$$\Delta Z_{i+1}^* = \sqrt{\left( \frac{V \sin A_{i+1} \sin(\psi - A_{i+1})(A_{i+1} - A_i + 2\pi) - \sin(A_i - \psi) \sin(A_i - A_{i+1})}{\omega \sin^2(A_i - A_{i+1})} \right)^2 (\Delta A^*)^2 + \left( \frac{V \sin(A_i - \psi) \sin A_i (A_{i+1} - A_i + 2\pi) - \sin(A_i - A_{i+1}) \sin A_{i+1}}{\omega \sin^2(A_i - A_{i+1})} \right)^2 (\Delta A^*)^2 + \left( \frac{\cos(A_i - \psi) \sin A_{i+1} V}{\sin(A_i - A_{i+1}) \omega} (A_{i+1} - A_i + 2\pi) \right)^2 (\Delta \psi^*)^2 + \left( \frac{\sin(A_i - \psi) \sin A_{i+1} (A_{i+1} - A_i + 2\pi)}{\sin(A_i - A_{i+1}) \omega} \right)^2 (\Delta V^*)^2}$$

Данные соотношения позволяют получить графические зависимости погрешностей измерения координат БЛА  $\Delta D$  от дальности до ма-

яка  $D$  при пролете в окрестности аэродрома отображенные на рис. 6.

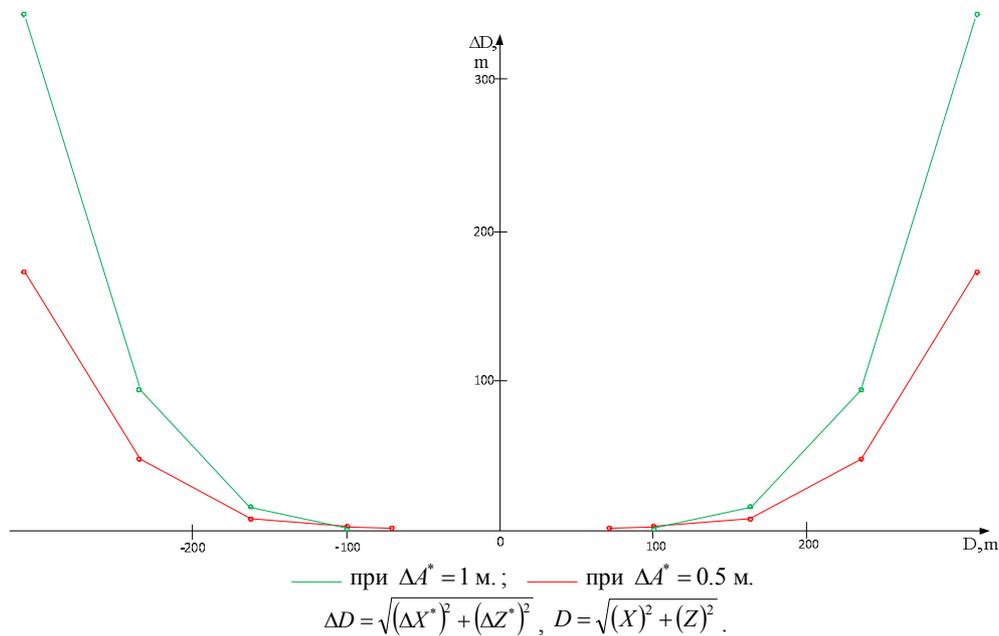


Рис. 6. Погрешности измерения координат местоположения БЛА

Графики показывают, что погрешности измерения координат БЛА минимальны при пролете напротив маяка и резко возрастают при удалении от него, что обусловлено погрешностью измерения азимута  $\Delta A^*$  и дальности  $D$ .

При этом измерение местоположения БЛА необходимо выполнять на минимальном удале-

нии от маяка.

### Заключение

Таким образом, предлагаемая система способна обеспечивать автоматическую навигацию БЛА в окрестности аэродрома. В качестве

наземных источников (маяков) предпочтительно использование полупроводниковых лазеров с некогерентным излучением длиной волны 1,55 мкм, которые обеспечивают работу системы в простых метеоусловиях. Графики показывают, что погрешности измерения координат БЛА минимальны при пролете напротив маяка и резко возрастают при удалении от него, что обусловлено погрешностью измерения азимута и дальности. При этом измерение местоположения БЛА необходимо выполнять на минимальном удалении от маяка.

#### Литература

1. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Кн. 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА. Кн. 2. Робототехнические комплексы на основе БЛА. М.: Изд. «Радиотехника», 2016. 1352 с.
2. Гришин В.А. Системы технического зрения в решении задач управления беспилотными летательными аппаратами // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 46–52.
3. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 752 с.
4. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. Курс лекций и практических занятий / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко и другие. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
5. Система технического зрения для информационного обеспечения автоматической посадки и движения по ВПП летательных аппаратов / С.М. Соколов, А.А. Богуславский, Н.Г. Фёдоров, П.В. Виноградов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2015. № 1. С. 96-109.
6. Бондарев В.Г., Смирнов Д.А. Автоматическая посадка летательного аппарата // Научный вестник ВГУ.

Серия системный анализ и информационные технологии. 2018. № 2. С. 44–51.

7. Локальная навигация беспилотного летательного аппарата при движении по взлетно-посадочной полосе к месту стоянки / В.Г. Бондарев, Д.А. Смирнов, Н.И. Майгурова, О.Л. Ерин // Вестник Академии военных наук. 2019. № 3 (68). С. 89–94.

8. Сарайский Ю.Н., Алешков И.И. Аэронавигация. Ч. I. Основы навигации и применение геотехнических средств: учеб. пособие. СПб: СПбГУГА, 2010. 302 с.

9. Кузьмин Н.А. Воздушная навигация и аэронавигационное обеспечение полетов: курс лекций: учеб. пособие. Ульяновск: УВАУ ГА, 2004. Ч. 1. 111 с.

10. Федосова Е.А. Бортовое радиоэлектронное оборудование: навигационные системы и комплексы. ФГУП «ГосНИИАС», 2014. 189 с.

11. Пучков А.В., Алдаев С.А. Анализ навигационного оборудования, обеспечивающего посадку беспилотных летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 2. С. 970-972.

12. Система слежения беспилотного летательного аппарата с использованием монокулярной системы технического зрения в гиростабилизированном подвесе / В.Г. Бондарев, Д.А. Смирнов, Н.И. Майгурова, А.В. Николенко, К.Ю. Гусев, С.Ю. Вахмин // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 15. № 5. 2019. С. 37–44.

13. Методика увеличения дальности получения устойчивого изображения лазерных наземных маяков на фотоматрице бортовой камеры беспилотного летательного аппарата / Д.А. Смирнов, А.С. Молчанов, В.Г. Бондарев, Н.И. Майгурова // I-Methods. 2020. Т. 12. № 2. С. 1–13.

14. Ширяев А.В. Лекции по дисциплине «Проектирование электронных приборов и устройств микроволнового диапазона» для направления подготовки специальности «Электроника и нанoeлектроника». ФГБОУ ВПО Северокавказский горно-металлургический институт ГТУ, 2014. 8 с.

Поступила 06.10.2021; принята к публикации 17.12.2021

#### Информация об авторах

**Смирнов Дмитрий Андреевич** - инженер-испытатель войсковой части 15650, Государственный лётно-испытательный центр Министерства обороны имени В.П. Чкалова (416504, Россия, г. Ахтубинск), e-mail: drone0806@ Rambler.ru

**Бондарев Валерий Георгиевич** - канд. техн. наук, профессор, доцент кафедры эксплуатации авиационного оборудования, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), e-mail: vaiu@mil.ru

**Николенко Александр Владимирович** - младший научный сотрудник 21 отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А); аспирант кафедры «Прикладная математика и механика», Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nikolenko.alexandr.93@yandex.ru

### SYSTEM FOR PROVIDING AUTOMATIC NAVIGATION OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE IN THE VICINITY OF AN AIRFIELD

D.A. Smirnov<sup>1</sup>, V.G. Bondarev<sup>2</sup>, A.V. Nikolenko<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>State Flight Test Center named after V.P. Chkalov, Military unit 15650, Akhtubinsk, Russia

<sup>2</sup>Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article discusses the development of a system capable of providing automatic navigation of an unmanned aerial vehicle in the vicinity of an airfield without the use of additional sensors. We considered an algorithm for solving this problem using an onboard monocular vision system operating in the range of 1.55 microns. To ensure navigation, the unmanned aerial vehicle is equipped with an information exchange system, and in the area of the take-off and landing point, we propose to use semiconductor lasers with incoherent radiation with a wavelength of 1.55 microns, which ensure the operation of the system in simple weather conditions, as ground sources (beacons). By measuring the azimuth angle at two points of the trajectory of the unmanned aerial vehicle, we calculated its location coordinates relative to the runway, as well as the course angle necessary to reach the starting point of the descent glide path. Since measurement errors are caused by errors in measuring the azimuth angle, course and flight speed, we neglected errors in measuring time intervals in this work. The obtained graphs show that the errors in measuring the coordinates of an unmanned aerial vehicle are minimal when flying in front of the lighthouse and increase sharply when moving away from it, which is due to the error in measuring azimuth and range. At the same time, the measurement of the location of the unmanned aerial vehicle must be carried out at a minimum distance from the lighthouse

**Key words:** navigation, unmanned aerial vehicle, airfield surroundings, semiconductor lasers, vision system, laser beacons

### References

1. Verba V.S., Tatarskiy B.G. "Complexes with unmanned aerial vehicles" ("Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami"), Moscow: Radiotekhnika, 2016, 1352 p.
2. Grishin V.A. "Systems of technical vision in solving problems of control of unmanned aerial vehicles", *Sensors and Systems (Datchiki i sistemy)*, 2009, no. 2, pp. 46–52.
3. Shapiro L., Stockman J. "Computer vision" ("Komp'yuternoe zrenie"), Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013, 752 p.
4. Visil'ter Yu.V., Zheltov S.Yu., Bondarenko A.V. et al. "Image processing and analysis in machine vision tasks" ("Obrabotka i analiz izobrazheniy v zadachakh mashinnogo zreniya. Kurs lektsiy i prakticheskikh zanyatiy"), Moscow: Fizmatkniga, 2010, 672 p.
5. Sokolov S.M., Boguslavskiy A.A., Fyedorov N.G., Vinogradov P.V. "System of technical vision for information support of automatic landing and movement on the runway of aircraft", *News of SFU. Technical Sciences (Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki)*, 2015, no. 1. pp. 96-109.
6. Bondarev V.G., Lopatkin D.V., Smirnov D.A. "Automatic landing of an aircraft", *Scientific Bulletin of VSU (Nauchnyy vestnik VGU)*, 2018, no. 2, pp. 44-51.
7. Bondarev V.G., Smirnov D.A., Maygurova N.I., Erin O.L. "Local navigation of an unmanned aerial vehicle when moving along the runway to the parking lot", *Bulletin of Military Academy of Sciences (Vestnik Akademii voyennykh nauk)*, Moscow, 2019, no. 3 (68), pp. 89-94.
8. Sarayskiy Yu.N., Aleshkov I.I. "Aeronautics. Part I. Fundamentals of navigation and application of geotechnical means" ("Aeronavigatsiya. CH. I. Osnovy navigatsii i primeneniye geotekhnicheskikh sredstv"), textbook, St. Petersburg: SPbGUGA. 2010, 302 p.
9. Kuz'min N.A. "Air navigation and aeronautical flight support" ("Vozdushnaya navigatsiya i aeronavigatsionnoye obespecheniye poletov"), Ulyanovsk: UVAU GA. 2004, 111 p.
10. Fedosova E.A. "Avionics: navigation systems and complexes" ("Bortovoe radioelektronnoye oborudovanie: navigatsionnye sistemy i komplekсы"), GosNIIAS, 2014, 189 p.
11. Puchkov A.V., Aldaev S.A. "Analysis of navigation equipment that ensures the landing of unmanned aerial vehicles", *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics (Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki)*, 2015, vol. 2, pp. 970-972.
12. Bondarev V.G., Smirnov D.A., Maygurova N.I., Nikolenko A.V., Gusev K.Yu, Vakhmin S.Yu. "Tracking system of unmanned aerial vehicle using monocular vision systems in gyro-stabilized suspension", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 5, pp. 37-44.
13. Smirnov D.A., Molchanov A.S., Bondarev V.G., Maigurova N.I. "Methodology for increasing the range of obtaining a stable image of laser ground beacons on the photographic matrix of the onboard camera of an unmanned aerial vehicle", *I-Methods*, 2020, vol. 12, no. 2, pp. 1-13.
14. Shiryayev A.V. "Lectures on the discipline "Design of electronic devices and devices of the microwave range" for the specialty "Electronics and nanoelectronics" ("Proyektirovaniye elektronnykh priborov i ustroystv mikrovolnovogo diapazona» dlya napravleniya podgotovki spetsial'nosti «Elektronika i nanoelektronika»)", North Caucasus Mining and Metallurgical Institute of GTU, 2014, 8 p.

Submitted 06.10.2021; revised 17.12.2021

### Information about the authors

**Dmitriy A. Smirnov**, test engineer, State Flight Test Center named after V.P. Chkalov, Military Unit 15650 (Akhtubinsk 416504, Russia), e-mail: drone0806@rambler.ru

**Valeriy G. Bondarev**, Cand. Sc. (Technical), Professor, Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E.Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: vaiu@mil.ru

**Aleksandr V. Nikolenko**, Junior researcher, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E.Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia); graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: nikolenko.alexandr.93@yandex.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЛОЧНОГО ПСЕВДООБРАЩЕНИЯ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ

Е.П. Трофимов

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

**Аннотация:** предложен алгоритм последовательной обработки данных на основе блочного псевдообращения матриц полного столбцового ранга. Показывается, что формула блочного псевдообращения, лежащая в основе алгоритма, является обобщением одного шага алгоритма Гревилля псевдообращения в невырожденном случае и потому может быть использована для обобщения метода нахождения весов нейросетевой функции LSHDI (linear solutions to higher dimensional interlayer networks), основанного на алгоритме Гревилля. Представленный алгоритм на каждом этапе использует найденные на предыдущих этапах псевдообратные к блокам матрицы и, следовательно, позволяет сократить вычисления не только за счет работы с матрицами меньшего размера, но и за счет повторного использования уже найденной информации. Приводятся примеры применения алгоритма для восстановления искаженных работой фильтра (шума) одномерных сигналов и двумерных сигналов (изображений). Рассматриваются случаи, когда фильтр является статическим, но на практике встречаются ситуации, когда матрица фильтра меняется с течением времени. Описанный алгоритм позволяет непосредственно в процессе получения входного сигнала перестраивать псевдообратную матрицу с учетом изменения одного или нескольких блоков матрицы фильтра, и потому алгоритм может быть использован и в случае зависящих от времени параметров фильтра (шума). Кроме того, как показывают вычислительные эксперименты, формула блочного псевдообращения, на которой основан описываемый алгоритм, хорошо работает и в случае плохо обусловленных матриц, что часто встречается на практике

**Ключевые слова:** блочное псевдообращение, обработка данных, алгоритм Гревилля

### Введение

Задача обработки данных нередко сводится к решению переопределенной системы линейных алгебраических уравнений [1-5]. В общем случае для переопределенных систем в качестве решения берется минимальный по норме вектор, дающий оптимальное в смысле наименьших квадратов решение, называемое псевдорешением [6-8]. Часто псевдорешение находится методом псевдообращения матриц, однако такой метод не всегда является оптимальным.

В большинстве случаев принимается, что входные данные известны в полном объеме, однако на практике возникают ситуации, когда данные поступают с некоторой задержкой или их обработка происходит последовательно. В такой ситуации к исходной матрице системы поэтапно добавляются столбцы, и для нахождения псевдорешения требуется пересчет полученной матрицы на каждом этапе. В данном случае нахождение псевдообратной матрицы методом сингулярного разложения не будет оптимальным, так как операция псевдообращения имеет третий порядок сложности  $O(n^3)$  и при больших  $n$ . При поступлении очередного блока данных нам уже известна псевдообратная

матрица к блоку на предыдущем этапе, поэтому предлагается использовать формулу блочного псевдообращения, полученного в [9,14]:

$$[H_1 \ H_2]^+ = \begin{bmatrix} E & H_1^+ H_2 \\ H_2^+ H_1 & E \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_1^+ \\ H_2^+ \end{bmatrix}.$$

Несмотря на то, что в формуле также используется псевдообращение матриц, оно затрагивает только блоки исходной матрицы, что позволяет сократить количество вычислений. Кроме того, формула применима для обработки сигнала, поступающего с разных источников, то есть позволяет находить псевдообратную матрицу при добавлении нескольких блоков.

В частном случае предлагаемый алгоритм является одним шагом алгоритма Гревилля (или одним шагом алгоритма Качмажа [15-16]) и может быть применен для обучения нейронных сетей [3] или для решения задачи идентификации окрестностных систем с предысторией [12].

### Постановка задачи

Пусть  $Y$  – входной сигнал, а  $X$  – исходный сигнал.  $X, Y$  могут быть как векторными, так и матричными величинами. Пусть также входной сигнал получается путем воздействия каких-либо помех на исходный сигнал по следующей формуле:

$$Y = HX, \quad (1)$$

где  $H$  – матрица, например, в случае одномерного электрического сигнала  $H$  будет наборов векторов, составленных из значений импульсной характеристики источника за определенный период времени. Далее предположим, что входящий сигнал к нам поступает порционно. На первом этапе мы получили часть входящего вектора  $Y_1$  и части матрицы преобразования исходного вектора  $H_1$ :

$$H_1 X_1 = Y_1.$$

На следующем этапе мы принимаем вторую часть сигнала, получим уравнение

$$[H_1 \ H_2] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix}.$$

И так далее для  $n$  этапов:

$$[H_1 \ H_2 \ \dots \ H_n] \begin{bmatrix} X_1 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix}.$$

Предположим, что матрица  $[H_1 \ H_2 \ \dots \ H_n]$  имеет полный столбцовый ранг. Ставится задача частичного восстановления исходного вектора  $[X_1^T \ X_2^T \ \dots \ X_n^T]^T$  при поступлении  $i$ -го блока данных  $H_i$ , если известны  $H_1^+, \dots, H_{i-1}^+$ . Алгоритм решения данной задачи опишем в следующем разделе.

### Описание алгоритма

На первом этапе имеем:

$$H_1 X_1 = Y_1, \text{ откуда } X_1 = H_1^+ Y_1$$

На втором этапе

$$[H_1 \ H_2] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = [H_1 \ H_2]^+ \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix}.$$

Чтобы найти  $[H_1 \ H_2]^+$ , воспользуемся формулой (1) [9]:

$$[H_1 \ H_2]^+ = \begin{bmatrix} E & H_1^+ H_2 \\ H_2^+ H_1 & E \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_1^+ \\ H_2^+ \end{bmatrix}, \quad (2)$$

тогда восстановленный сигнал находится по формуле:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & H_1^+ H_2 \\ H_2^+ H_1 & E \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_1^+ \\ H_2^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

При поступлении дальнейших частей сигнала формула (2) используется рекуррентно (матрица  $[H_1 \ H_2]$  будет первым блоком для матрицы  $[H_1 \ H_2 \ ; \ H_3]$  и так далее). В случае, если требуется добавить сразу несколько блоков, когда, например, сигнал поступает с разных источников, то формула (2) приобретет вид:

$$\begin{aligned} [H_1 \ \dots \ H_N]^+ &= \\ &= \begin{bmatrix} [H_1^+] \\ \dots \\ [H_N^+] \end{bmatrix} [H_1 \ \dots \ H_N]^{-1} \begin{bmatrix} H_1^+ \\ \dots \\ H_N^+ \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

откуда исходный вектор

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ \dots \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [H_1^+] \\ \dots \\ [H_N^+] \end{bmatrix} [H_1 \ \dots \ H_N]^{-1} \begin{bmatrix} H_1^+ \\ \dots \\ H_N^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ \dots \\ Y_N \end{bmatrix}.$$

Нахождение псевдообратной матрицы по формуле (2) имеет такой же порядок сложности, как и нахождение с помощью сингулярного разложения или формулы псевдообращения матрицы полного столбцового ранга  $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$  [6-8,13]. Однако мы знаем псевдообратную матрицу для блока  $H_1$ , и за счет разбиения на блоки (понижения размерности матриц) мы получаем оценку сложности в  $O(\frac{7}{2} n^3)$ .

Предлагаемый алгоритм работает в случае, если матрица имеет полный столбцовый ранг и число строк больше или равно числу столбцов (в обратном случае формула легко транспонируется), однако в задачах восстановления сигнала данное требование почти всегда выполняется. Кроме того, вычислительные эксперименты показывают, что алгоритм хорошо справляется даже с плохо обусловленными матрицами. Также алгоритм подходит для случая, когда шум не является статическим. В этом случае мы имеем возможность пересчитывать псевдообратную матрицу при изменении какой-либо зашумленной части.

### Пример применения алгоритма для восстановления сигнала

В одномерном случае искомым сигналом  $x(t)$  определяется интегральным уравнением свёртки [1-2]

$$y(t) = \int_0^t h(t - \tau) x(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где  $h(t)$  – импульсная характеристика фильтра,  $y(t)$  – выходной сигнал. Переходя к интегральной сумме

$$y(t) = \sum_0^{K-1} T h(t - kT) x(kT), \quad (5)$$

где  $T$  – шаг интервала,  $K$  – количество интервалов,  $k$  – номер интервала. Обозначим  $H(t) = T h(t - kT)$  и  $X = x(kT)$ , получим

$$y(t) = \sum_0^{K-1} H(t) X.$$

Обозначая  $H = H(H_1 \ H_2 \ \dots \ H_K)$ , получим систему линейных уравнений

$$Y = HX. \quad (6)$$

Тогда исходный сигнал восстанавливается по формуле

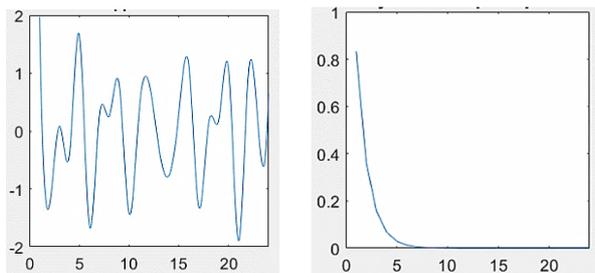
$$X = H^+ Y. \quad (7)$$

Матрица  $H$  имеет вид:

$$H = T \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ h_{(K-1)} & h_{(K-2)} & \dots & h_0 \end{bmatrix},$$

где  $h_i = h(i)$  – значение импульсной характеристики в момент времени  $i$ .

Приведем пример. Пусть исходный сигнал задается как  $\sin(3t + 5) + \sin(8t)$ ,  $t = [1, 24]$ . А импульсная характеристика  $h(t) = \frac{1}{RC} e^{-t/RC}$ , где  $R$  и  $C$  – параметры цепи.



а) исходный сигнал      б) импульсная характеристика

Рис. 1. Графики исходного сигнала и импульсной характеристики

Тогда график входящего сигнала:

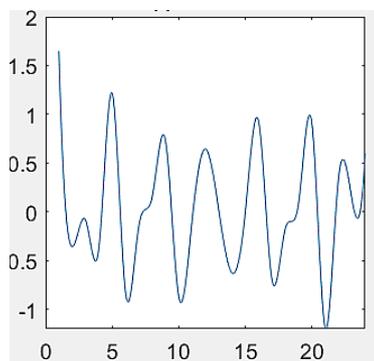


Рис. 2. График входящего сигнала

Входящий сигнал будем принимать в 4 этапа:  $t_1 = [1,4]$ ,  $t_2 = (4,8]$ ,  $t_3 = (8,20]$ ,  $t_4 = (20,24]$ . Восстановление на первом этапе сводится к нахождению псевдообратной для блока  $H_1 = [h_4(4) \ h_3(3) \ h_2(2) \ h_1(1)]$ .

При получении первой части сигнала  $t_1 = [1,4]$  находим часть восстановленного вектора как  $x_1 = h_1^+(1)y_1$ :

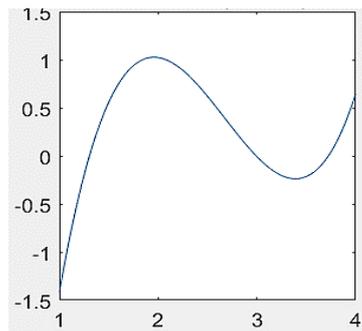


Рис. 3. Восстановленный на первом этапе сигнал

При поступлении второй части сигнала  $y_2$  вектор исходного сигнала  $[x_1^T \ x_2^T]^T$  восстанавливается по формуле

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & h_1^+ h_2 \\ h_2^+ h_1 & E \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}.$$

График восстановленного сигнала  $[x_1^T \ x_2^T]^T$

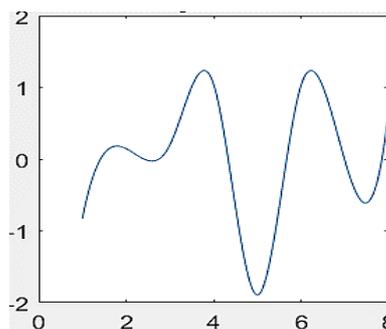


Рис. 4. Восстановленный на втором этапе сигнал

На третьем этапе мы знаем  $H_2^+ = [h_2 \ h_1]^+$ . Тогда третью часть исходного сигнала найдем по формуле

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & H_2^+ h_3 \\ h_3^+ H_2^+ & E \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}.$$

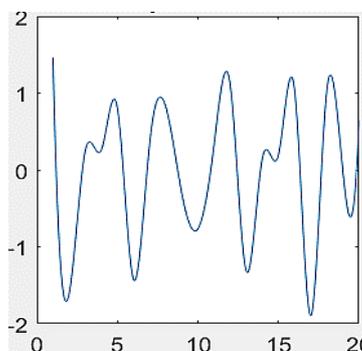


Рис. 5. Восстановленный на третьем этапе сигнал

При получении последней части сигнала мы находим псевдообратную матрицу к полной матрице  $H$ , следовательно, получаем полностью восстановленный сигнал:

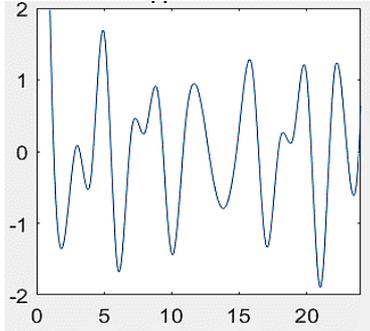


Рис. 6. Полностью восстановленный на четвертом этапе сигнал

Видно, что восстановленный сигнал полностью идентичен первоначальному. Очевидно, что эффективность данного алгоритма зависит от размерности блоков, обусловленности матрицы и наиболее эффективен при больших (широких) блоках.

### Сведение к алгоритму Гревилля и применение к обучению нейросетей

В работе [3] представлен алгоритм LSHDI (linear solutions to higher dimensional interlayer networks), который используется для нахождения весовых коэффициентов многослойного перцептрона [10]. Рассматриваемая нейросеть задается как

$$y_{n,t} = \sum_{j=1}^M w_{n,j}^{(2)} g \left( \sum_{i=1}^L w_{j,i}^{(1)} x_{i,t} \right),$$

где  $t$  – время или индекс ряда,  $x_t \in R^{L \times 1}$  – входные данные,  $y_t \in R^{N \times 1}$  – выходной слой,  $y_{n,t}$  – линейная сумма весов  $w_{n,j}^{(2)}$  для  $M$  слоев,  $n$  – выход слоя  $j$ ,  $i$  – индекс входящего вектора,  $g$  – функция активации. Тогда задачу настройки весов можно выразить следующим образом. Дан набор из  $k$  выходов скрытых слоев

$$a_{j,t} = g \left( \sum_{i=1}^L w_{j,i}^{(1)} x_{i,t} \right),$$

которые можно представить в виде матрицы  $A = [a_1 \dots a_k]$ , обозначая за  $W$  матрицу весов,  $Y$  выходные значения запишем:

$$WA = Y \Rightarrow W = YA^+.$$

В алгоритме LSHDI используется формула Гревилля:

$$W_k = Y_k A_k^+ = [Y_{k-1} \ y_k] \begin{bmatrix} A_{k-1}^+ (E - a_k b_k^T) \\ b_k^T \end{bmatrix} = W_{k-1} + (y_k - W_{k-1} a_k) b_k^T,$$

где  $b_k = (a_k^T T a_k)^{-1} T a_k$  и  $T = (A_{k-1} A_{k-1}^T)^+$ .

Однако можно показать, что формула Гревилля в случае полного столбцового ранга является частным случаем формулы (2). Чтобы это показать, нужно в явном виде расписать обратную матрицу

$[H_{n-1} \ h_n]^{-1} = \begin{bmatrix} E & H_{n-1}^+ h_n \\ h_n^+ H_{n-1} & e \end{bmatrix}^{-1}$  ( $h_2, e$  – столбцы) с помощью формулы окаймленной матрицы [8]:

$$H^{-1} = \begin{bmatrix} E + \frac{H_{n-1}^+ h_n h_n^+ H_{n-1}}{\alpha} & -\frac{H_{n-1}^+ h_n}{\alpha} \\ -\frac{h_n^+ H_{n-1}}{\alpha} & \frac{1}{\alpha} \end{bmatrix},$$

где  $\alpha = 1 - h_n^+ H_{n-1} H_{n-1}^+ h_n$ . Умножив полученную матрицу на  $\begin{bmatrix} H_{n-1}^+ \\ h_n^+ \end{bmatrix}$  и упрощая, получим

$$H^{-1} = \begin{bmatrix} H_{n-1}^+ (E - h_n \tau) \\ \tau \end{bmatrix},$$

где  $\tau = \frac{h_n^+}{\alpha} (E - H_{n-1} H_{n-1}^+)$ . Полученная формула является одним шагом алгоритма Гревилля в невырожденном случае [11].

### Восстановление изображений

Восстановление изображений происходит аналогично восстановлению сигналов, с той лишь разницей, что в уравнении (10)  $X$  и  $Y$  – матрицы.

Для примера рассмотрим изображение размером  $512 \times 512$ :



Рис. 7. Исходное изображение

Пусть на исходное изображение воздействует матрица шума  $H_{512 \times 512}$  (см. рис. 8) с нормально распределенными элементами, то есть  $Y = HX$ .

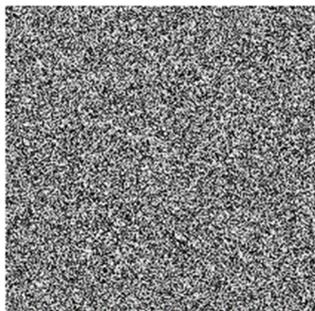


Рис. 8. Матрица шума

Под воздействием шума исходное изображение примет вид:

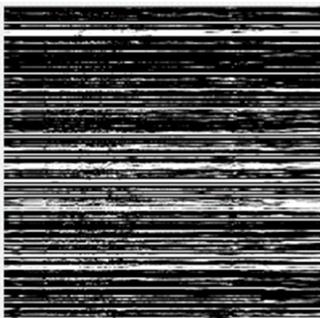


Рис. 9. Зашумленное изображение

Пусть теперь на обработку поступает первый блок данных размером  $512 \times 280$ , по которому с помощью формулы (5) мы можем получить частично восстановленную область изображения размером  $280 \times 280$  (рис. 10).

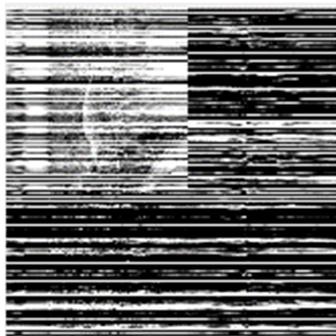


Рис. 10. Восстановление по первому блоку данных изображение

Предположим, что на втором шаге поступает блок размером  $512 \times 120$ , позволяющий получить больше информации об исходном изображении.

Восстановленный блок изображения будет иметь размер  $(280+120) \times (280+120)$ .



Рис. 11. Восстановление по двум блокам

На третьем шаге поступает последний блок данных размером  $512 \times 120$ . В результате работы алгоритма общий размер всех блоков составит  $512 \times 512$ , и мы получим полностью восстановленное изображение (рис. 12).



Рис. 12. Восстановленное изображение

## Выводы

В статье предложен алгоритм последовательной обработки данных, основанный на полученной ранее автором формуле блочного псевдообращения матриц полного столбцового ранга. В случае, когда обработка данных сводится к решению систем линейных уравнений и происходит последовательно, с добавлением очередных блоков данных, предложенный алгоритм во многих случаях обладает вычислительными преимуществами по сравнению с аналогами. Кроме того, алгоритм хорошо справляется со случаем плохо обусловленных матриц, что часто встречается на практике. Алгоритм может быть использован в задачах параметрической идентификации для уточнения модели при поступлении новых данных или в случае добавления в ранее построенные окрестностные модели новых узлов.

Литература

1. Самойленко М.В. Матрично-итерационный метод решения системы линейных уравнений и его применение в томографическом сканировании пространства с использованием радиолокационной станции // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 437-446.
2. Самойленко М.В. Восстановление сигнала на входе фильтра по выходному сигналу и импульсной характеристике // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2017. Т. 7. № 2. С. 194-198.
3. Tapson J., A. van Schaik. Learning the pseudoinverse solution to network weights // Neural Networks. 2013. Volume 45. P. 94-100
4. Efficient Signal Reconstruction for a Broad Range of Applications/ A. Abolfazl, A. Jeess, N. Azade, N.Z. Saravanan Thirumuruganathan, D. Gautam, S. Divesh// SIGMOD Rec. 2019. №48. 1. P. 42–49.
5. Shmyrin A.M., Mishachev N.M. and Trofimov E.P. Neighborhood Systems Priority Identification and Randomized Kaczmarz Algorithm// International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2018. pp. 1-4. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501772.
6. Алберт А. Псевдоинверсия, регрессия и рекуррентное оценивание. М.: Наука, 1977. 224 с.
7. Вержбицкий В.М. Вычислительная линейная алгебра. М.: Высш. шк., 2009. 351 с.
8. Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры // Физматгиз. 1963. 132 с.
9. Трофимов Е.П. О псевдообращении блочных матриц полного ранга // Системы управления и информационные технологии. 2020. №2(80). С. 24-27
10. Bishop C.M. Neural networks for pattern recognition // Oxford: Oxford University Press. 2008. 482 p.
11. Трофимов Е.П. О количестве арифметических действий в алгоритме Гревилля // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2020. № 1 (42). С. 27-31.
12. Шмырин А.М., Мишачёв Н.М., Трофимов Е.П. Коррекция линейной окрестностной модели с учетом новых данных // Вестник российских университетов. Математика. 2015. №20.5. С. 1544-1546.
13. Melzer T. SVD and its Application to Generalized // Eigenvalue Problems. 2004. №1.3. P. 1-16
14. Shmyrin A.M., Mishachev N.M., Trofimov E.P. A Note on Heuristic Analog of Cline’s Formula // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. 2016. № 12.4. P. 3401—3405
15. Kaczmarz S. Approximate solution of system of linear equations // Internar J. Control. 1993. V. 57. N 6. p.1271.

Поступила 21.10.2021; принята к публикации 15.12.2021

Информация об авторах

**Трофимов Евгений Павлович** - аспирант кафедры высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: trofimovep@list.ru

USING BLOCK PSEUDOREVERSION IN SEQUENTIAL DATA PROCESSING

E.P. Trofimov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

**Abstract:** the paper proposes an algorithm for sequential data processing based on block pseudoinverse of full column rank matrixes. It is shown that the block pseudoinverse formula underlying the algorithm is a generalization of one step of the Greville’s pseudoinverse algorithm in the nonsingular case and can also be used as a generalization for finding weights of neural network function in the LSHDI algorithm (linear solutions to higher dimensional interlayer networks). The presented algorithm uses the pseudoinversed matrixes found at each step, and therefore allows one to reduce the computations not only by working with matrixes of smaller size but also by reusing the already found information. Examples of application of the algorithm for signal and image reconstruction are given. The article deals with cases where noise is static but the algorithm is similarly well suited to dynamically changing noises, allowing one to process input data in blocks on the fly, depending on changes. The block pseudoreverse formula, on which the described algorithm is based, works well in the case of ill-conditioned matrixes, which is often encountered in practice

**Key words:** block pseudoreverse, data processing, Greville’s algorithm

References

1. Samoylenko M.V. “Matrix-iterative method for solving a system of linear equations and its application in tomographic space scanning using radar station”, *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics (Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki)*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 437-446.
2. Samoylenko M.V. “Signal reconstruction at the filter input by the output signal and impulse response”, *DSPA: Problems of Digital Signal Processing Applications (DSPA: Voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov)*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 194-198.
3. Tapson J., Van Schaik A. “Learning the pseudoinverse solution to network weights”, *Neural Networks*, 2013, vol. 45, pp. 94-100.
4. Abolfazl A., Jeess A., Azade N., Saravanan T., Nan Z., Gautam D., Divesh S. “Efficient signal reconstruction for a broad range of applications”, *SIGMOD Rec.*, March 2019, no. 48.1, pp. 42–49.

5. Shmyrin A. M., Mishachev N. M., Trofimov E.P. "Neighborhood systems priority identification and randomized Kaczmarz algorithm", *Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon)*, Sochi, Russia, 2018, pp. 1-4.
6. Albert A. "Pseudoinversion, regression, and recurrence estimation" ("Psevdoinversiya, regressiya i rekurrentnoe otsenivanie"), Moscow: Nauka, 1977, 224 p.
7. Verzhbitskiy V.M. "Computational linear algebra" ("Vychislitel'naya lineynaya algebra"), Moscow: Vysshaya shkola, 2009, 351 p.
8. Faddeev D.K., Faddeeva V.N. "Computational methods of linear algebra" ("Vychislitel'nye metody lineynoy algebrы"), Fizmatgiz, 1963, 132 p.
9. Trofimov E.P. "On pseudo-inversion of block matrices of full rank", *Control Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2020, no. 2(80), pp. 24-27.
10. Bishop C.M. "Neural networks for pattern recognition", Oxford University Press, 2008.
11. Trofimov E.P. "On the number of arithmetic actions in Greville's algorithm", *Bulletin of Lipetsk State Technical University (Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, 1 (42), pp. 27-31.
12. Shmyrin A.M., Mishachev N.M., Trofimov E.P. "Correction of a linear neighborhood model with new data", *Bulletin of Russian Universities. Mathematics (Vestnik rossiyskikh universitetov. Matematika)*, 2015, no. 20.5, pp. 1544-1546.
13. Melzer T. "SVD and its application to generalized", *Eigenvalue Problems*, 2004, no. 1.3, pp. 1-16.
14. Shmyrin A.M., Mishachev N.M., Trofimov E.P. "A note on heuristic analog of Cline's formula", *Global J.I of Pure and Applied Mathematics*, 2016, no. 12.4, pp. 3401-3405.
15. Kaczmarz S. "Approximate solution of system of linear equations", *Int. J. Control*, 1993, vol. 57, no. 6, pp. 1271.

Submitted 21.10.2021; revised 15.12.2021

#### Information about the author

**Evgeniy P. Trofimov**, graduate student, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: trofimovep@list.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННЫХ АНТЕНН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СКРЫТНОСТИ РАДИОСВЯЗИ В VHF ДИАПАЗОНЕ****И.А. Баранников, Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассматривается плазменная вибраторная антенна, которая предназначена для работы в VHF диапазоне на частоте 140 МГц. Вибраторные плазменные антенны отличаются от обычных вибраторных антенн тем, что металлический проводник заменяется плазмой в газоразрядной трубке. Плазменный вибратор, создаваемый разрядом в трубке, способен включаться и выключаться за время порядка микросекунд. Применение плазменной антенны позволяет обеспечить два режима работы: активный, когда плазма индуцирует проводящую поверхность, и скрытый, когда антенна становится практически невидимой для электромагнитных волн, а плазменное облако отсутствует. Для определения характеристик антенны использовалось электродинамическое моделирование. Полученные результаты показывают, что характеристики плазменной вибраторной антенны близки к характеристикам эквивалентного ей металлического диполя, при этом длина плазменной антенны меньше. Для определения эффективности скрытого режима антенны производилось сравнение характеристик эффективной площади рассеяния плазменной антенны с выключенным плазменным облаком и эквивалентного металлического диполя. Полученные результаты показывают, что плазменная антенна обладает высокой эффективностью излучения, диаграммами направленности, схожими с эквивалентной дипольной антенной, и значительно меньшими значениями эффективной площади рассеяния (ЭПР) в выключенном режиме

**Ключевые слова:** плазменная вибраторная антенна, скрытность радиосвязи

**Введение**

Плазменные антенны позволяют обеспечить связь в динамическом режиме. При появлении плазменного облака происходит формирование проводящей поверхности, которая выступает излучателем, если же облако не сформировано, антенна представляет собой полый стеклянный цилиндр, который обладает малыми значениями эффективной площади рассеяния (ЭПР) и не излучает ЭМВ. Таким образом, применение плазменных антенн позволяет существенно повысить скрытность радиосвязи без использования сложных метаматериальных пластин, особой формы излучателей. Теория возможности формирования таких антенн описана в [1].

В работе [2] авторы приводят описание процедуры излучения плазменных антенн, при этом удается достичь максимально близкой диаграммы направленности к изначальной металлической антенне (полуволновой диполь). Математическое описание плазмы позволяет достичь того, что управление характеристиками излучения возможно не только путем изменения резонансных частот материала плазмы и размеров антенны, но и путем формирования

многомодового излучения. Благодаря особенностям конструкции и характеристикам излучения материала плазмы удастся также уменьшить длину излучателя.

В работе [3] производится сравнение характеристик излучения для плазменной антенны и алюминиевого диполя. Полученные результаты показывают, что использование плазменных антенн позволяет сохранить все наиболее важные характеристики излучателя: КНД, КПД, диапазон рабочих частот. Таким образом, можно сделать вывод об эффективности использования плазменных антенн, при этом их использование позволяет понизить зашумление радиопространства, так как при отсутствии необходимости формирования канала антенна отключается и, в связи с этим, пропадает проводящая поверхность.

В работе [4] авторы проводят эксперимент, который показывает, что излучение плазменной антенны возможно только в случае формирования плазменного облака, при его же отсутствии КНД антенны падает значительно менее 0 дБ. Путем проведения эксперимента было показано, что характеристики плазменного излучателя максимально схожи с полным металлическим диполем.

В работе [5] авторы приводят пример формирования реконфигурируемой плазменной антенны, причем изменение характеристик излучения вызывается различными резонансными свойствами плазмы в излучателе, что приводит к формированию дополнительных каналов связи. Помимо этого, авторы рассматривают антенну с полным металлическим рефлектором, что приводит к ухудшению ЭПР антенны, а низкие значения ЭПР в выключенном состоянии являются одним из самых главных преимуществ плазменных антенн.

В работе [6] авторы приводят пример сравнения электродинамического моделирования плазменной антенны с экспериментальными данными, как показали результаты, удается достичь высокой корреляции результатов. Таким образом, выполнение электродинамического моделирования позволяет эффективно получить результаты и решить поставленную задачу по получению характеристик излучателя. Авторы также показывают, что использование плазменных антенн в антенной решетке позволяет достичь управления характеристиками диаграммы направленности.

В данной статье производится моделирование плазменной антенны, а также ее режимов работы; для выявления эффективности снижения радиолокационной заметности антенны в выключенном режиме производилось сравнение характеристик ЭПР с металлическим полноволновым диполем.

### Конструкция антенны

Плазменная антенна представляет собой полый стеклянный цилиндр, в котором помещается вещество (плазма). В данном случае для возбуждения излучателя использовался металлический колодец, который передает возбужденное поле на излучатель. Для плазмы важным параметром является ее частота, которая определяется выражением:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m_e}}, \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация свободных электронов или мера ионизации плазмы,  
 $e$  – заряд электрона,  
 $m_e$  – масса электрона.

Для исследуемой модели (рис. 1) частота плазмы составляла 2 ГГц.

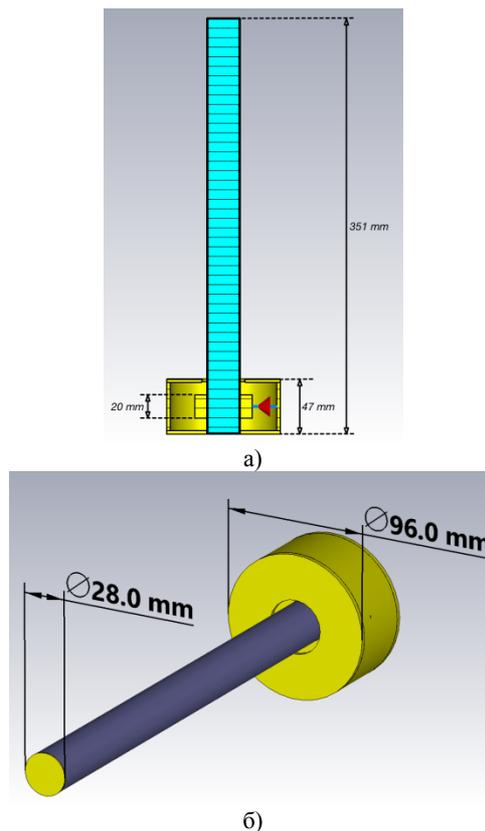


Рис. 1. Модель исследуемой антенны: а) вертикальный разрез антенны с питающим элементом; б) диаметры плазменной антенны и питающего колодца

При подаче напряжения на стеклянный цилиндр в нем возникает плазменное облако, которое выступает в роли излучателя, что формирует антенну, причем для рассматриваемой конструкции целевым является диапазон 140 МГц. Для проверки характеристик антенны производилось электродинамическое моделирование.

### Моделирование характеристик плазменной антенны

Так как плазменное облако обладает достаточно узким резонансным диапазоном, требуется очень точная настройка антенны на целевой диапазон. В рассматриваемом случае диапазон рабочих частот определяется по уровню возвратных потерь ( $S_{11}$ ) менее -10 дБ (рис. 2а), а также очень важным является сохранение высокого уровня КПД в рабочем диапазоне частот (рис. 2б).

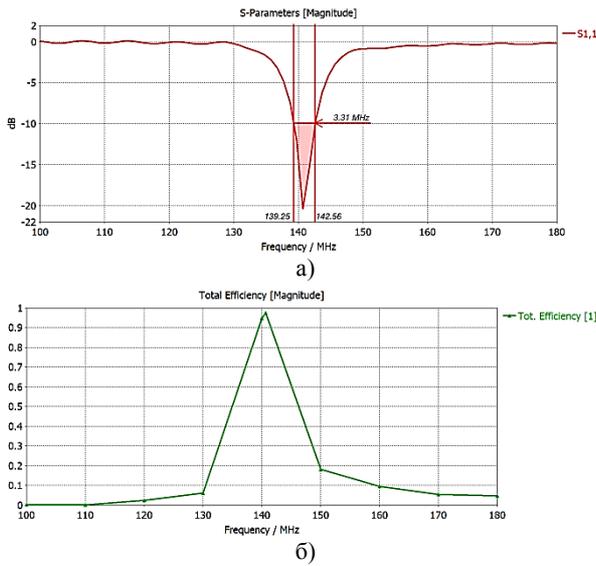


Рис. 2. Характеристики излучателя: а) график возвратных потерь с обозначенным диапазоном рабочих частот; б) КПД антенного элемента

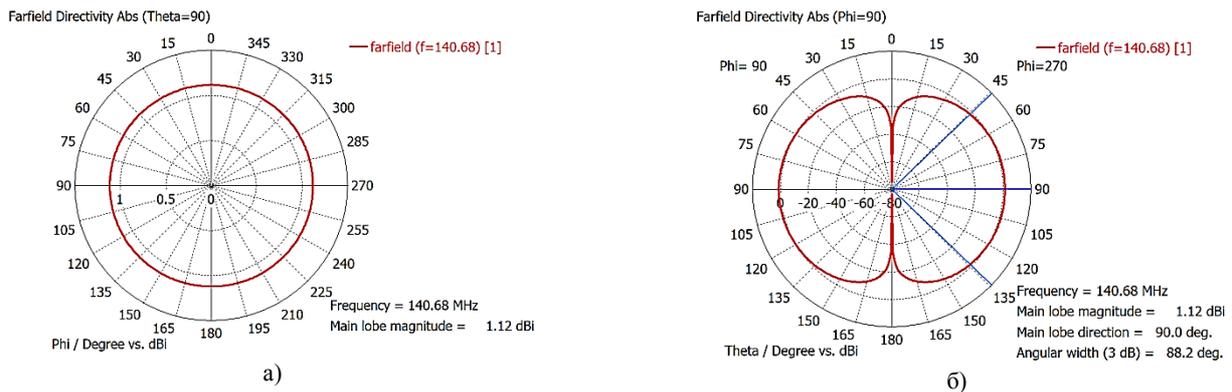


Рис. 3. Диаграмма направленности полученной плазменной антенны: а) горизонтальная плоскость; б) вертикальная плоскость

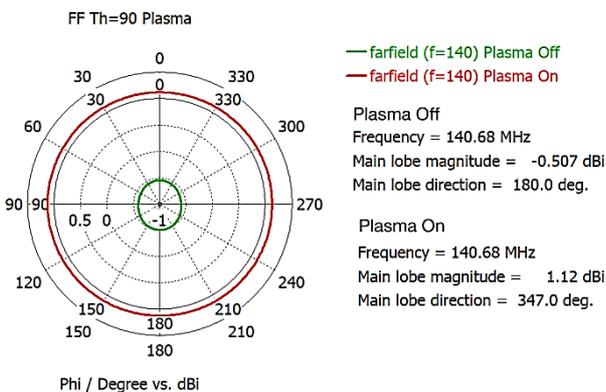


Рис. 4. Сравнение диаграмм направленности антенны при включенной и выключенной плазме

После отключения плазмы видно, что КНД антенны уменьшился с 1.12 дБи до -0.507 дБи,

Как видно, полученный антенный элемент обладает рабочим диапазоном от 139.25 до 142.56 МГц, что является целевым диапазоном работы антенного элемента, а КПД антенны в рабочем диапазоне частот не опускается ниже 88%, что позволяет сделать вывод о большой эффективности антенного элемента. Диаграмма направленности антенны для частоты минимума  $S_{11}$  (140.68 МГц) приводится на рис. 3.

Как видно по полученным результатам, антенна обладает характеристиками излучения, которые схожи с полуволновым диполем, при этом, если отсутствует плазменное облако, диаграмма направленности значительно ослабляется и излучение практически отсутствует (рис. 4).

таким образом, понижение составило 1.627 дБ, что соответствует уменьшению на 145.3 %. Видно, что при отсутствии плазменного облака излучение отсутствует, а, следовательно, антенный элемент становится практически невидимым для электромагнитных волн. Для сравнения характеристик эффективной площади рассеяния (ЭПР) производилось сравнительное моделирование с металлическим полуволновым диполем, который был разработан для того же диапазона рабочих частот – длина диполя 982 мм (что в 2.8 раза больше, чем длина изначальной плазменной антенны (рис. 1)). Диаграммы направленности диполя и плазменной антенны во включенном режиме приводятся на рис. 5.

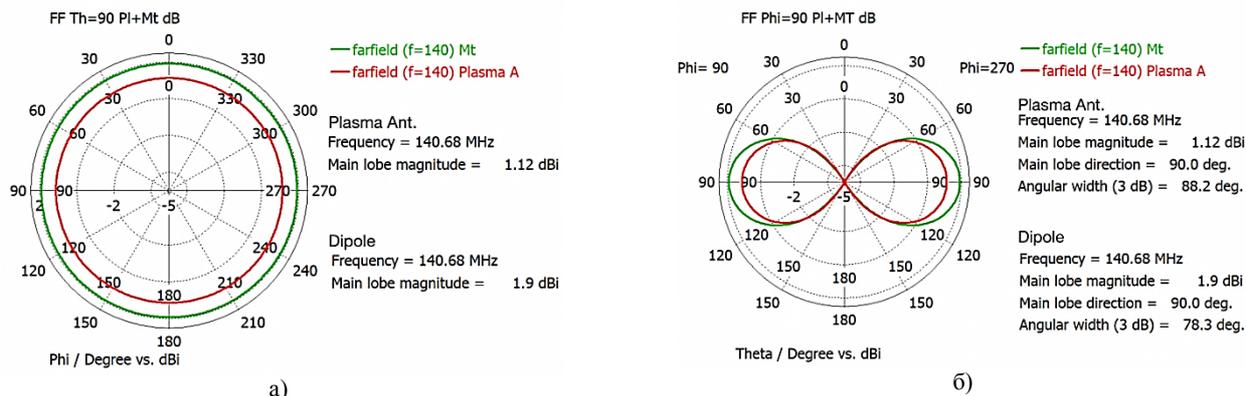


Рис. 5. Диаграммы направленности плазменной антенны и полуволнового диполя: а) горизонтальная плоскость; б) вертикальная плоскость

Как видно из полученных результатов, КНД металлического диполя больше, чем у разработанной плазменной антенны, однако стоит учитывать, что металлический диполь обладает значительно большими размерами, а также лишен возможности скрытного режима. Для определения характеристик ЭПР производилось облучение выключенной плазменной антенны и металлического диполя плоской электромагнитной волной, при этом производилось сохранение значений ЭПР – рис. 6.

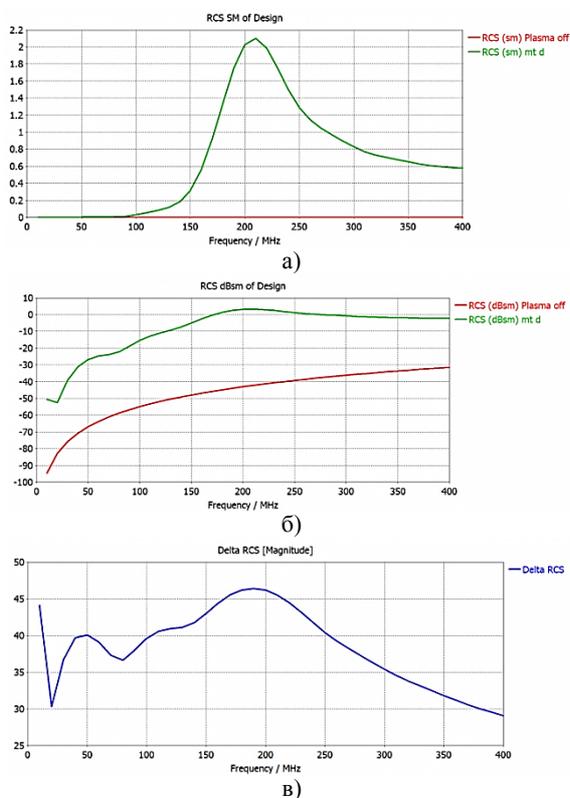


Рис. 6. Сравнение характеристик ЭПР металлического диполя и выключенной плазменной антенны: а) ЭПР в м<sup>2</sup>; б) ЭПР в дБм<sup>2</sup>; в) разность ЭПР в дБм<sup>2</sup>

Как видно из полученных результатов, ЭПР выключенной плазменной антенны значительно

ниже, чем у полуволнового диполя. Для анализа всех результатов воспользуемся таблицей.

Сравнение характеристик плазменной антенны и эквивалентного полуволнового диполя

Характеристика	Плазменная антенна	Металлический диполь
Длина антенны, мм	351	982
КНД max (f=140.68 МГц), дБ	1.12	1.9
КПД (f=140.68 МГц), %	97.43	96.54
ЭПР (f=140.68 МГц), м <sup>2</sup>	1.23 · 10 <sup>-5</sup>	0.187
ЭПР (f=140.68 МГц), дБм <sup>2</sup>	-49.09	-7.28

Заключение

Плазменные антенны позволяют достичь характеристик, которые схожи с эквивалентными металлическими диполями, при этом они обладают меньшими размерами, обладают скрытным режимом (когда выключены), что позволяет значительно снизить ЭПР объекта. Дальнейшее развитие технологии плазменных антенн может быть направлено на разработку реконфигурируемых антенн, так, из плазменных ячеек возможно создание перестраиваемых рефлекторов, антенных решеток. Полученные результаты в ходе проведенного исследования показали, что плазменные антенны являются одним из передовых устройств для формирования канала связи в VHF диапазоне.

Литература

- Anderson T. Plasma Antennas. Artech House: USA, 2011. 203 p.
- Ye H.Q., Gao M. and Tang C.J. Radiation Theory of the Plasma Antenna// IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011. Vol. 59. No. 5. pp. 1497-1502. DOI: 10.1109/TAP.2011.2123051.
- Rayner J.P., Whichello A.P. and Cheetham A.D. Physical characteristics of plasma antennas// IEEE Transac-

tions on Plasma Science, 2004, Vol. 32, No. 1, pp. 269-281. DOI: 10.1109/TPS.2004.826019.

4. Mohammad Mahdi Abbasi, Shahrooz Asadi, Abbas Pirhadi. The comprehensive design of high efficiency monopole plasma antenna using surfaguide exciting method// *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. 2020. Vol. 121. 8 p.

5. Oumar Alassane Barro, Mohamed Himdi, and Olivier Lafond. Reconfigurable Cylindrical Plasma Antenna // *Progress In Electromagnetics Research M*. 2018. Vol. 66. P. 65-72.

6. Sun, Jian and Yuemin Xu. Simulation study of plasma antenna reconfigurable performance// 2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE). 2015. P. 67-70.

Поступила 14.10.2021; принята к публикации 16.12.2021

#### Информация об авторах

**Баранников Илья Андреевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

**Ищенко Евгений Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## APPLICATION OF PLASMA ANTENNA TECHNOLOGY TO IMPROVE RADIO COMMUNICATION STEALTH IN VHF BAND

I.A. Barannikov, E.A. Ishchenko, S.M. Fyedorov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article discusses a plasma dipole antenna, which is designed to operate in the VHF band at a frequency of 140 MHz. Plasma dipole antennas differ from conventional dipole antennas in that the metal conductor is replaced by plasma in the discharge tube. The plasma dipole created by the discharge in the tube is capable of turning on and off in times of the order of microseconds. The use of a plasma antenna makes it possible to provide two modes of operation: active, when the plasma induces a conductive surface, and hidden, when the antenna becomes practically invisible to electromagnetic waves, and the plasma cloud is absent. We used electrodynamic modeling to determine the characteristics of the antenna. The results show that the characteristics of the plasma dipole antenna are close to those of the equivalent metal dipole, while the length of the plasma antenna is shorter. To determine the efficiency of the hidden mode of the antenna, we compared the characteristics of radar cross-section of the plasma antenna with the plasma cloud turned off and the equivalent metal dipole. The results obtained show that the plasma antenna has a high radiation efficiency, directional patterns similar to an equivalent dipole antenna, and significantly lower RCS values in the off mode

**Key words:** plasma dipole antenna, radio communication stealth

#### References

1. Anderson T. "Plasma antennas", USA: Artech House, 2011, 203 p.
2. Ye H.Q., Gao M., Tang C.J. "Radiation theory of the plasma antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, May 2011, vol. 59, no. 5, pp. 1497-1502, doi: 10.1109/TAP.2011.2123051.
3. Rayner J.P., Whichello A.P., Cheetham A.D. "Physical characteristics of plasma antennas", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Feb. 2004, vol. 32, no. 1, pp. 269-281, doi: 10.1109/TPS.2004.826019.
4. Mohammad Mahdi Abbasi, Shahrooz Asadi, Abbas Pirhadi "The comprehensive design of high efficiency monopole plasma antenna using surfaguide exciting method", *AEU - International Journal of Electronics and Communications* 2020, vol. 121, pp. 8.
5. Oumar Alassane Barro, Mohamed Himdi, Olivier Lafond "Reconfigurable cylindrical plasma antenna", *Progress In Electromagnetics Research M*, 2018, vol. 66, 65-72.
6. Sun Jian, Yuemin Xu "Simulation study of plasma antenna reconfigurable performance", *2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE)*, 2015, pp. 67-70

Submitted 14.10.2021; revised 16.12.2021

#### Information about authors

**Илья А. Баранников**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

**Евгений А. Ищенко**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Sergey M. Fyedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ДИАГНОСТИКЕ И РЕМОНТУ МАЛОМОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

М.А. Ромащенко, А.В. Гудков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрены вопросы оптимизации технологических процессов поиска и устранения неисправностей маломощных DC-DC преобразователей, изготавливаемых ООО «АЕДОН». Перечислены наиболее характерные неисправности, встречающиеся у импульсных источников питания малой мощности. Рассмотрены основные методы поиска и устранения неисправностей, применяемые в процессе диагностики импульсных преобразователей. Предложен подход, основывающийся на комбинировании различных методов диагностики и ремонта, позволяющий увеличить эффективность поиска и устранения неисправностей импульсных DC-DC преобразователей. Рассматриваемый подход позволил повысить оперативность технической диагностики и ремонта в условиях серийного производства, а также был эффективно использован при первоначальной подготовке молодых специалистов участка регулировки и тестирования. В качестве примера представлена процедура поиска и устранения причин повышенного напряжения холостого хода в маломощных импульсных источниках питания. Рассмотрены причины появления дефекта как в одиночных модулях, так и во всей партии. Проведено экспериментальное исследование влияния обратной связи на выходное напряжение модуля в режиме холостого хода, показано влияние возможных неисправностей. В результате применения данной процедуры в короткий срок была произведена диагностика и ремонт маломощного импульсного источника питания (ИИП), выполнена регулировка обратной связи по напряжению

**Ключевые слова:** импульсный источник питания, техническая диагностика, DC-DC преобразователи

### Введение

Импульсные источники питания (ИИП) являются объектами серийного производства. После выхода с участка поверхностного монтажа изделия попадают на участок регулировки и тестирования, где выполняется проверка параметров. В случае любых отклонений от технологической инструкции по тестированию модули передаются в группу ремонта. Специалистами данной группы осуществляется техническая диагностика модулей, их регулировка и устранение неисправностей.

Общая скорость прохождения партий модулей по технологическим операциям производства в значительной степени зависит от оперативности тестирования, а при необходимости и от сроков устранения неисправностей. Таким образом, задача минимизации сроков технической диагностики и ремонта модулей является неизменно актуальной для любого современного предприятия.

### Виды неисправностей маломощных ИИП

Выделяют следующие наиболее характерные неисправности, встречающиеся у ИИП малой мощности:

- отсутствие выходного напряжения ( $U_{\text{вых}}=0$ );
- пульсации выходного напряжения превышают норму ( $U_{\text{пуль}}>N$ ) в нормальных климатических условиях (НКУ), при охлаждении или при прогреве;
- пониженное выходное напряжение в одном или нескольких режимах работы преобразователя ( $U_{\text{вых}}<N$ );
- повышенное выходное напряжение в одном или нескольких режимах работы модулей ( $U_{\text{вых}}>N$ );
- напряжение холостого хода выше нормы ( $U_{\text{хх}}>N$ ) в различных температурных режимах;
- КПД ниже нормы (или отсутствует его технологический запас);
- отказ дистанционного управления;
- выбросы напряжения на силовых транзисторах и диодах выше нормы;
- низкая кратность снижения тока потребления при срабатывании защиты от короткого замыкания выходной цепи;
- коэффициент токовой защиты ( $K_{\text{тз}}$ ) не в норме.

### Основные методы технической диагностики и ремонта ИИП

Рассмотрим основные методы поиска и устранения неисправностей, применяемые в процессе диагностики ИИП [1].

1. Метод внешнего осмотра (печатной платы, трансформатора и др. элементов, качества монтажа). Высокоэффективный метод, позволяющий быстро выявить неисправности на ранней стадии поиска. Требуется внимательности, а в случаях осмотра SMD-компонентов малых типоразмеров, наличия оптических приборов (штативной лупы либо микроскопа) [2].

Данный метод диагностики был применен при ремонте обратного понижающего DC-DC преобразователя, представленного на рис. 1.

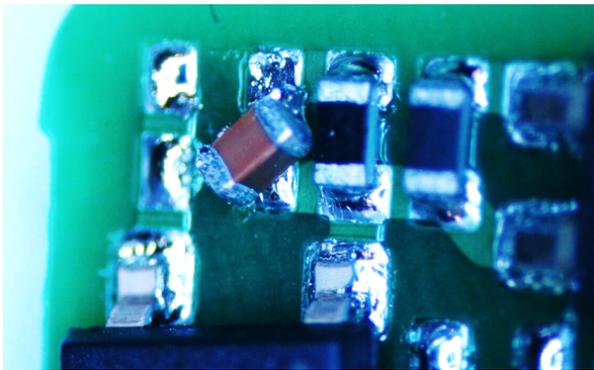


Рис. 1. Участок печатной платы неисправного DC-DC преобразователя

Неисправность проявилась в виде пульсации выходного напряжения большой амплитуды (рис. 2). Причиной неисправности, обнаруженной при внешнем осмотре, был сдвиг с контактной площадки конденсатора корректирующей RC-цепочки обратной связи модуля.

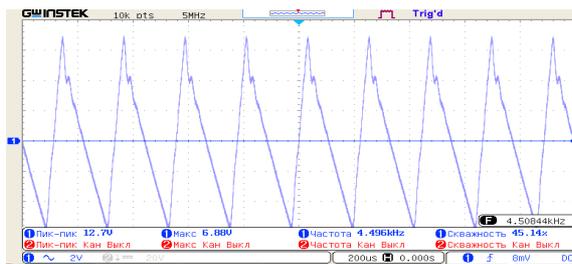


Рис. 2. Повышенный размах пульсации выходного напряжения DC-DC преобразователя

2. Метод измерений. Включает в себя проверку омметром электрических цепей на отсутствие замыканий, а также наличие требуемых электрических соединений. Данный метод включает в себя измерения параметров электрорадиоэлементов (например, сопротивления, емкости), проверку полупроводниковых приборов и т.д. [3].

3. Метод снятия рабочих параметров. В этом случае неисправный модуль включается в

рабочих условиях и производится снятие его характеристик, проверка амплитуды, формы, частоты сигнала в контрольных точках модуля, проверяется правильность прохождения импульсов по различным цепям модуля.

4. Метод сравнения. Производится сравнение всех измеренных характеристик с рабочим образцом. Локализацию дефекта можно определить по различиям измеренных параметров, осциллограмм, отличию внешнего вида. Данный метод может быть использован только в том случае, если имеется хотя бы один рабочий модуль в партии.

5. Метод исключения. Применяется для поиска неисправного узла схемы за счет сужения области поиска. При этом производится отключение какого-либо участка электрической цепи модуля. Данный метод может эффективно применяться лишь в сочетании с иными методами диагностики.

6. Метод замены. Предполагает замену трансформатора, радиоэлемента или submodule, являющихся предположительно неисправными. Метод применяется как для сужения круга поиска причин неисправности, так и для непосредственного устранения выявленных причин.

7. Метод внешнего воздействия. Применяется как механическое воздействие, так и температурное. Возможны охлаждения или нагрев всей печатной платы, либо отдельных элементов. Также к данному методу можно отнести подачу внешнего напряжения к отдельным участкам схемы модуля с последующим контролем необходимых параметров [4].

8. Проверка температуры элементов. В данном случае с помощью тепловизора проверяется температура различных элементов или участков схемы. На основе полученных данных делаются различные выводы о работе схемы.

9. Метод типовых неисправностей. Высокоэффективен при массовом производстве изделий. На основании имеющегося опыта ремонта, известных слабых мест схемы или конструкции модуля составляются списки типовых возможных неисправностей, их причин и возможные пути устранения.

В настоящий момент опыт ремонта модулей передается путем наставничества. То есть в процессе производственного обучения, от опытных специалистов к более молодым, преимущественно в устной форме, а также с опорой на немногочисленные методические указания, имеющиеся по отдельным видам модулей. Основным недостатком данного подхода является разрозненность и обрывочность информации,

что приводит к увеличению сроков получения профессиональных навыков и компетенций молодыми специалистами, возрастанию сроков накопления опыта диагностики и ремонта. Таким образом, появляется фактор, снижающий общую скорость прохождения партий модулей на участке регулировки и тестирования.

Предлагаемая методика направлена на сокращение сроков пребывания модулей в ремонтной группе, то есть на повышение оперативности поиска и устранения дефектов в условиях серийного производства. Помимо этого, методика может быть эффективно использована при первоначальной подготовке молодых специалистов (учеников) участка регулировки и тестирования, а также в начальный период, особенно первый год, их самостоятельной работы.

Суть предлагаемой методики состоит в том, что выявив круг основных неисправностей

маломощных ИИП, составляются рекомендации и блок-схемы по поиску и ремонту типовых дефектов. Таким образом, опираясь на опыт ремонта модулей в условиях предприятия ООО «АЕДОН», а также комбинируя различные методы поиска и устранения отказов, формируются подходы, оптимизирующие данный технологический процесс.

### Процедура диагностики и устранения причин, приводящих к повышенному напряжению холостого хода

На рис. 3 изображена блок-схема поиска и устранения неисправности, приводящей к повышенному напряжению холостого хода ( $U_{хх} > N$ ). Данная процедура входит в состав корневой методики оптимизации диагностики и ремонта маломощных ИИП.

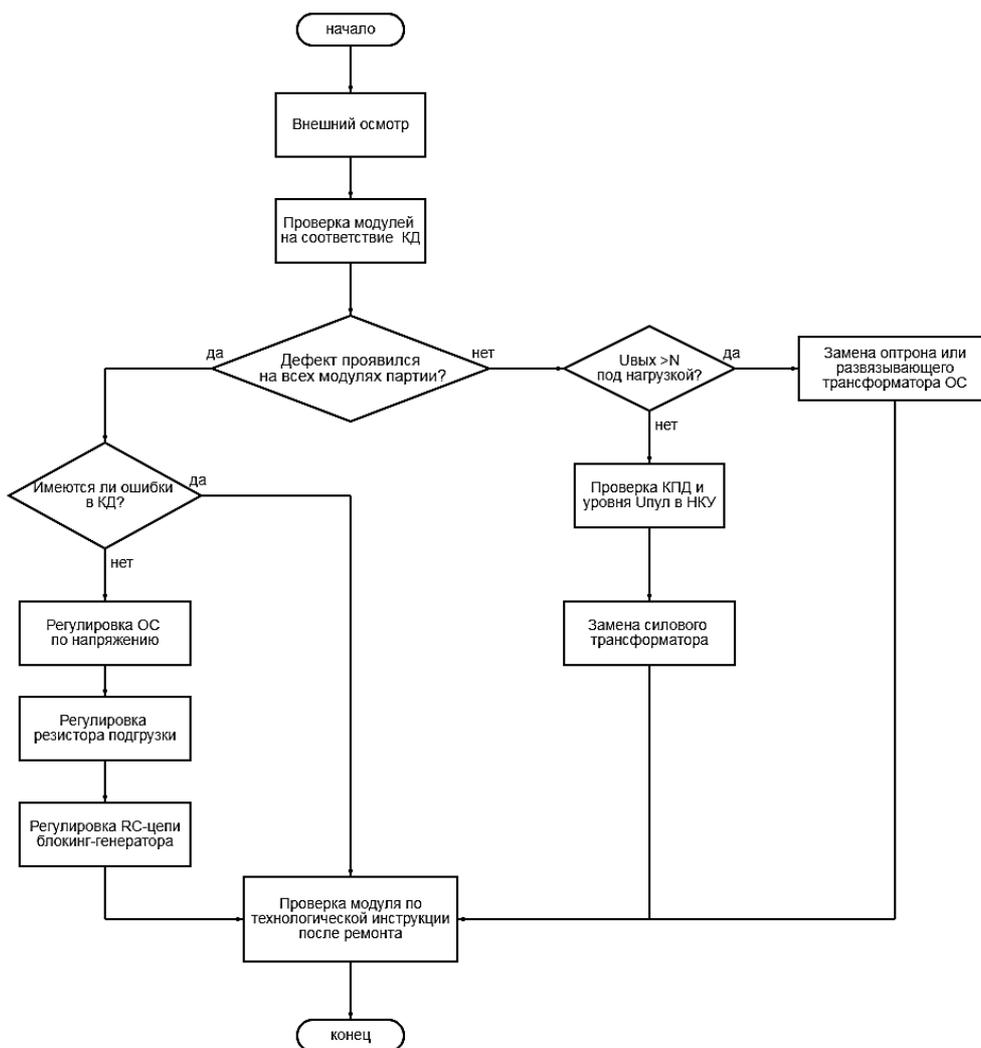


Рис. 3. Процедура поиска и устранения причин повышенного напряжения холостого хода

Применение данной процедуры подразумевает отсутствие дефектов стенда и приспособлений проверки модулей, наличие исправного и поверенного контрольно-измерительного оборудования, а также правильность его настройки, установки входных напряжений и токов нагрузки регулятором.

Первоначальная диагностика выполняется методом внешнего осмотра. Далее проводится проверка модулей на соответствие конструкторской документации (КД). Особое внимание обращается на проверку соответствия номиналов и наименований элементов в цепи обратной связи по напряжению и элементов на выходе модуля. Также на соответствие КД могут проверяться точные изделия. В случае отказа всей партии возможна сверка КД с оригиналом из архива.

Проводится измерение управляющего сигнала на затворе полевого транзистора (силового ключа). Следует обратить особое внимание на амплитуду, ширину и частоту импульсов в режиме холостого хода [5]. Далее производится регулировка резисторов в цепи ОС по напряжению. При любых изменениях в данной цепи необходимы проверки величины  $U_{\text{вых}}$  выходного напряжения на всех режимах работы модуля.

В случае если указанная выше регулировка не дала результата, производим уменьшение номинала резистора подгрузки, включенного параллельно выходу модуля до цепи выходного фильтра. Данный резистор повышает устойчивость работы конвертера в режиме холостого хода, однако его применение неизбежно снижает КПД.

В обратных преобразователях, реализованных на основе блокинг-генератора, уменьшение напряжения  $U_{\text{хх}}$  может быть достигнуто регулированием RLC-цепочки автогенератора. В данном случае возможно незначительное увеличение номинала низкоомного последовательного резистора. При этом необходим контроль его температуры, так как данная регулировка приводит к возрастанию рассеиваемой мощности на резисторе. Также возможно уменьшение емкости конденсатора в данной цепи, что приведет к снижению энергии импульсов на затворе силового ключа. Любая регулировка блокинг-генератора может привести к появлению повышенных значений  $U_{\text{вых}}$  в различных режимах работы модуля по нагрузке, входному напряжению и температуре.

В случае если  $U_{\text{хх}}$  больше нормы в единичных модулях партии, наиболее вероятной

причиной является дефект силового трансформатора. Дополнительно он может проявляться в появлении большой пульсации выходного напряжения под нагрузкой в НКУ, а также в пониженном КПД по сравнению с остальными модулями партии.

В отдельных случаях, когда выходное напряжение выше нормы как под нагрузкой, так и на холостом ходу, причиной может быть отказ оптрона или развязывающего трансформатора.

Любой ремонт ИИП завершается полной проверкой модулей согласно технологической инструкции. В случаях регулировок цепей обратной связи и блокинг-генератора рекомендуется последующее проведение предварительных климатических испытаний.

В качестве примера применения данной процедуры рассмотрим процесс диагностики DC-DC преобразователя мощностью 5 Вт и выходным напряжением 15 В. Как видно из рис. 4, после запуска модуля холостой ход в два раза превысил значение выходного напряжения.



Рис. 4. Напряжение холостого хода выше нормы ( $U_{\text{хх}} > N$ )

После внешнего осмотра и проверки номиналов элементов обратной связи по напряжению на соответствие конструкторской документации производим контроль напряжения на затворе силового ключа в режиме холостого хода (рис. 5).

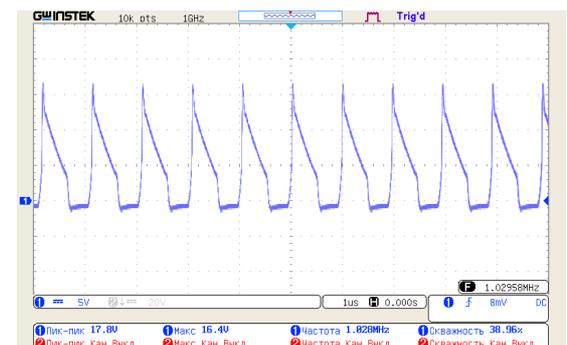


Рис. 5. Сигнал на затворе силового ключа до ремонта

На представленной осциллограмме видно значительную амплитуду и ширину затворных импульсов в режиме холостого хода. Было произведено снижение номиналов регулировочных токоограничивающих резисторов в цепи оптрона обратной связи по напряжению. Как видно на рис. 6, энергия импульсов значительно уменьшилась.

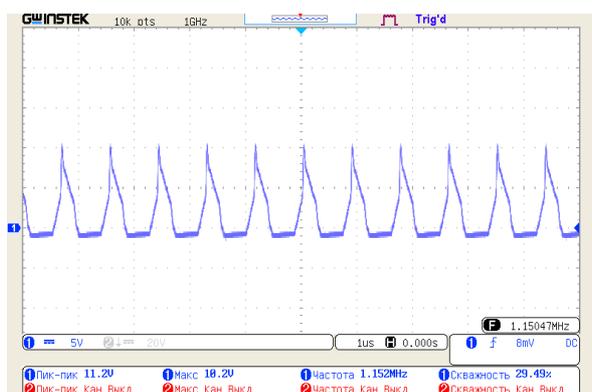


Рис. 6. Сигнал на затворе силового ключа после ремонта

После ремонта проводится полное тестирование всех необходимых параметров модуля. Повторная проверка показала, что напряжение холостого хода в пределах нормы (рис. 7).

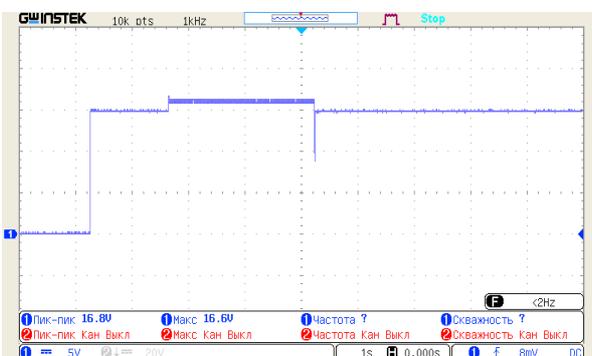


Рис. 7. Напряжение холостого хода после ремонта

## Заключение

В результате применения данной процедуры в короткий срок была произведена диагностика и ремонт маломощного ИИП. Выполнена регулировка обратной связи по напряжению, что привело к уменьшению энергии импульсов на затворе полевого транзистора, снижению продолжительности открытого состояния силового ключа, и как следствие, понижению напряжения холостого хода.

Таким образом, применение данных подходов способствует оптимизации временных затрат на диагностику и ремонт ИИП в условиях серийного производства ООО «АЕДОН».

## Литература

1. Игнатович В.Г., Митюхин А.И. Регулировка и ремонт бытовой радиоэлектронной аппаратуры. Мн.: Выш. шк., 2005. 367 с.
2. Дэвидсон Г. Поиск и ремонт неисправностей в радиоэлектронной аппаратуре без схем. М.: НТ Пресс, 2007. 537с.
3. Томел Д., Уидмер Н. Поиск неисправностей в радиоэлектронике/ пер. с англ. С.О. Махарадзе. М.: НТ Пресс, 2007. 416 с.
4. Young J. Troubleshooting and repairing switch mode power supplies. 3rd Edition, 2020. 271 p.
5. Коростелин А.В. Импульсные источники питания. Элементная база, архитектура и ремонт. М.: СОЛОН-Пресс, 2020. 392 с.

Поступила 14.10.2021; принята к публикации 15.12.2021

## Информация об авторах

**Ромашенко Михаил Александрович** – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kigr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

**Гудков Андрей Владимирович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: agudkov@kwsystems.ru

## MODERN APPROACHES TO DIAGNOSTICS AND REPAIR OF LOW-POWER SWITCHING POWER SUPPLIES

M.A. Romashchenko, A.V. Gudkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article considers the issues of optimization of technological processes for troubleshooting low-power DC-DC converters manufactured by company AEDON. We listed the most typical malfunctions that occur in low-power switching power sources. We considered the main methods of troubleshooting used in the process of diagnostics of pulse converters. We propose an approach based on the combination of various diagnostic and repair methods, which allows one to increase the efficiency of troubleshooting of pulsed DC-DC converters. The considered approach allowed us to increase the efficiency of technical diagnostics and repair in the conditions of mass production, and was also effectively used in training of young specialists of the adjustment and testing subdivision. As an example, we present the procedure for finding and eliminating the causes of increased idle voltage in low-power switching power sources. We considered the reasons for the appearance of the defect both in single modules and in the entire batch. We carried out an experimental study of the effect of feedback on the output voltage of the module in the idle mode. We showed the influence of possible failures. As a result of the application of this procedure, we performed diagnostics and repair of a low-power switching power supplies in a short time and adjusted the voltage feedback

**Key words:** switching power supply, technical diagnostics, DC-DC converters

#### References

1. Ignatovich V.G., Mityukhin A.I. "Adjustment and repair of household electronic equipment" ("Regulirovka i remont bytovoy radioelektronnoy apparatury"), Minsk: Vysshaya shkola, 2005, 367 p.
2. Davidson G. "Troubleshooting in electronic equipment without circuits", Moscow: NT Press, 2007, 537 p.
3. Tomel D., Widmer N. "Troubleshooting in radio electronics", Moscow: NT Press, 2007.
4. Young J. "Troubleshooting and repairing switch mode power supplies", 2020, 271 p.
5. Korostelin A.V. "Switching power supplies. Element base, architecture and repair" ("Impul'snye istochniki pitaniya. Elementnaya baza, arkhitektura i remont"), Moscow: SOLON-Press, 2020, 392 p.

Submitted 14.10.2021; revised 15.12.2021

#### Information about the authors

**Mikhail A. Romashchenko**, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

**Andrey V. Gudkov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [agudkov@kwsystems.ru](mailto:agudkov@kwsystems.ru)

## МЕТОДИКА НАХОЖДЕНИЯ ПОТЕРЬ В ОБМОТКЕ ДРОССЕЛЯ ВСЛЕДСТВИЕ СКИН-ЭФФЕКТА И ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ

А.А. Моисеенко, С.М. Фёдоров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлен метод использования расчетных методик и моделирования магнитных полей в двухмерном пространстве для нахождения высокочастотных потерь в обмотке моточных изделий, таких как дроссель или трансформатор. Была проведена работа по анализу литературы по данной теме, а также поднят вопрос оптимизации и адаптации аналитических формул для случая использования проводников круглого сечения и намотки, имеющей неоднородное распределение слоев в окне сердечника. Был также поднят вопрос об аналитическом нахождении длины обмоточного провода намотки с различным количеством слоев и переменного количества используемых при этом витков. Для проведения автоматизации расчета с помощью формул был написан скрипт, строящий зависимость сопротивления переменному току относительно частоты, используя аналитические формулы. Была написана программа для автоматической постановки начальных условий и граничных значений параметров моделирования, процесса самого моделирования электромагнитных полей, анализа полученных данных, а также формирования массива для построения графика полученной при этом зависимости сопротивления от частоты. В данном методе используется свободно распространяемое программное обеспечение как для математических расчетов, так и моделирования электромагнитных полей. Итогом данной работы стало сравнение полученных результатов, которые показали хорошую сходимость и преемственность этапов данного метода

**Ключевые слова:** эффект близости, метод конечных элементов (МКЭ), FEMM, скин-эффект, Smath Studio, формула Дуэлла

### Введение

При расчетах трансформаторов и дросселей в силовой электронике очень часто сталкиваешься с необходимостью нахождения потерь в данных элементах и зачастую используются в основном только омические, разработчики часто забывают о потерях при поверхностной проводимости, потерях, связанных с эффектом близости, эффектом выпучивания магнитного поля из зазора сердечника и перезарядом емкости данного элемента. А они, в свою очередь, иногда могут превышать омические потери обмотки, порой в разы. И вследствие чего расчетное значение коэффициента полезного действия (КПД) будет разительно отличаться от полученного в результате изготовления изделия, что, в свою очередь, приведет к следующей итерации проектирования данного силового элемента, так как искомые показатели не были достигнуты.

Данные итерации к искомым показателям могут тянуться продолжительное время. Это может задержать дату завершения проекта и увеличить стоимость единицы изделия.

Одни из самых важных на практике являются скин-эффект и эффект близости, потому что с ними связана основная часть оцениваемых потерь. Также для указанных потерь есть

аналитические методы анализа и оценки. Явления скин-эффекта и эффекта близости в проводниках, вызванные током синусоидальной формы, рассматривались Дуэлла в пятидесятых годах прошлого века. Было сформулировано уравнение, которое с достаточной точностью позволяет определять сопротивление проводника в дросселе по переменному току. Но в импульсных источниках питания в основном используются токи с несинусоидальной формой, что приводит к дополнительным потерям вследствие наличия высокочастотных гармоник.

Такой подход позволит найти оптимальную толщину провода и конструкцию трансформатора до его моделирования, что облегчит работу с САПР и обеспечит экономию времени при разработке.

Цель этой статьи – показать, как с помощью методики приближенных вычислений и моделей, выполненных с помощью метода конечных элементов (МКЭ), оптимизировать и рассчитать высокочастотные потери, вызванные эффектом близости и скин-эффектом, для дросселей импульсных преобразователей. Такая методика позволяет найти оптимальную толщину провода и расположение витков, что, в свою очередь, обеспечит экономию времени при разработке моточного изделия.

МКЭ может быть использован для получения почти точных численных результатов. Но их

точность ограничена алгоритмами аппроксимаций и доступной вычислительной мощностью. Он может быть использован для моделирования магнитного поля, включая эффекты близости и выпучивания магнитного поля из зазора сердечника. Программное обеспечение (ПО) для такого моделирования слишком дорого как самостоятельный продукт, так и в вычислительном отношении. Поэтому для данного метода будет использовано ПО, такое как FEMM (Finite Element Method Magnetics), позволяющее проводить на персональных компьютерах расчет плоскомеридианных (осесимметричных) и плоскопараллельных, стационарных квазистационарных магнитных, а также стационарных электростатических полей. Пакет позволяет определять их полевые параметры и строить картины. Программа FEMM распространяется в рамках лицензии Aladdin Free Public, не допускающей взимания платы за распространение. В качестве ПО для проведения математических расчетов будет использоваться Smath Studio - бесплатная программа для вычисления математических выражений и построения графиков функций. Freeware: Creative Commons Attribution-NoDerivs.

### Постановка задачи

Для проверки работоспособности данного метода поставим перед собой простую инженерную задачу: рассчитать зависимость сопротивления обмотки от частоты для дросселя, намотанного на сердечнике ER7,5 проводом ПЭТВ2 — 0,2 мм, намотка состоит из 26 витков. Габаритные размеры сердечника и каркаса на рис. 1.

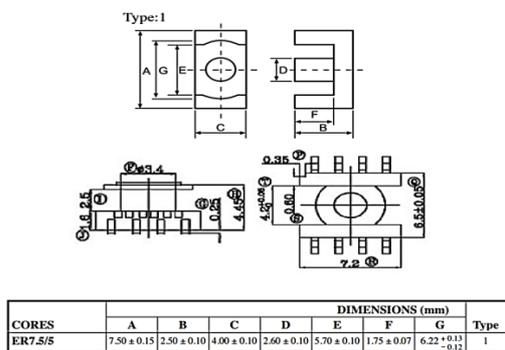


Рис. 1

На каркасе намотано шесть витков в два слоя и пять витков в три слоя.

Проведем анализ результатов модели на основе формулы Доуэлла и модели, построенной с помощью МКЭ.

### Аналитическое решение данной задачи

В начале статьи мы говорили о формуле Доуэлла. В ней общая мощность, рассеиваемая обмоткой, выражена как сумма потерь от 1 до n-го слоя. Данный момент является основой аналитического подхода, он нам позволяет определять потери в обмотке любых форм фактора на частотах отличных от нуля.

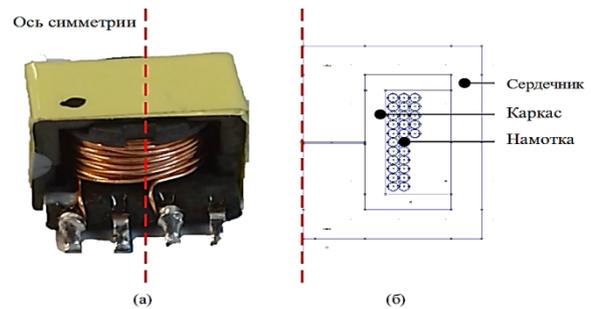


Рис. 2. Фотография данной намотки (а); построенная осесимметричная модель дросселя в FEMM (б)

Определим положение витков на каркасе рис. 2, на данном рисунке мы видим намотку дросселя, которую, в свою очередь, можно представить как две последовательно соединенных намотки с двумя слоями и тремя, соответственно, из этого следует, что необходимо рассчитать длину и сопротивление каждой из частей намотки.

$$R_{DC} = R_{half1} + R_{half2}. \quad (1)$$

Для расчета длины обмоток представим, что намотка идет виток на виток, тем самым можно рассматривать, как намотка в виде спирали, которую, в свою очередь, можно представить как сумму длин секторов в 180° с постоянным увеличением радиуса на радиус и изоляцию обмоточного провода.

По формуле 2 рассчитать количество образуемых секторов (в дальнейшем использован термин - «дуг»):

$$Chd_1 = Chs_1 \cdot 2 - 1, \quad (2)$$

где  $Chs_1$  - количество слоев в обмотке, а  $Chd_1$  - количество необходимых дуг.

Вычислим длину проволоки  $L_{Пров\_half1}$

$$L_{Пров\ half1} = \left( \sum_{n=0}^{Chd_1} \pi \cdot \left( \frac{Diam_p + \left(\frac{D_p + W_{изол}}{2}\right) \cdot n}{2} \right) \right) \cdot N_{ряд1} + \left( \sqrt{\left( (D_p + W_{изол}) \cdot Chd_1 \right)^2 + (D_p + W_{изол})^2} \right) \cdot N_{ряд1}, \quad (3)$$

где  $D_{\text{пр}}$  — диаметр провода,  $D_p$  — диаметр провода,  $W_{\text{изол}}$  — толщина изоляции,  $N_{\text{ряд1}}$  — количество рядов в намотке.

Зная длину обмотки, вычислим сопротивление данной части обмотки

$$R_{\text{half1}} = \frac{L_{\text{провhalf1}} \cdot \rho}{S_{\text{пров}}}, \quad (4)$$

где  $S_{\text{пров}}$  — площадь сечения используемой проволоки,  $\rho$  — удельное сопротивление меди.

Рассчитав сопротивление обмотки по постоянному току, необходимо использовать метод и формулу Доуэлла для расчета уже сопротивления по переменному электрическому току.

Напрямую использовать данную методику нельзя, так как она была создана для слоев, образованных проводниками в виде фольги, полностью занимающей высоту окна каркаса. В нашем случае используются проводники круглого сечения, это значит, что они должны быть аппроксимированы в прямоугольную фольгу.

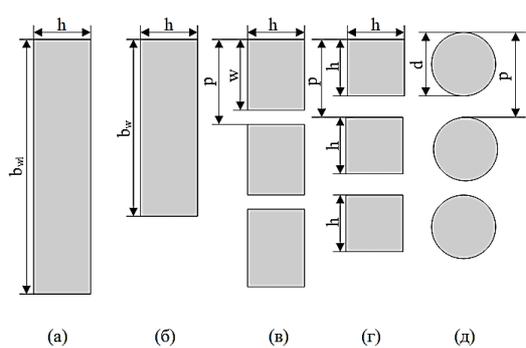


Рис. 3

Чтобы выполнить данное приближение распределения тока прямоугольного проводника к круглому, необходимо прибегнуть к вычислениям с использованием функции Бесселя. В проводе круглого сечения радиальное распределение плотности тока представляет собой функцию Бесселя аргумента, пропорциональную квадратному корню из частоты. При постоянном токе плотность тока равномерная, тогда как на высоких частотах ток концентрируется ближе к поверхности. Другим подходом для определения сопротивления обмотки переменного тока является численное моделирование в 2D или 3D, использование МКЭ. Доуэлл вывел 1D аналитическое уравнение для нахождения сопротивления переменному току обмоток фольгированных проводников. Это решение было преобразовано в квадратные проволочные обмотки. Чтобы применить его уравнение для обмотки, выполненной круглым проводником, круглый проводник может быть

аппроксимирован квадратным проводником той же площади поперечного сечения. Такой подход гарантирует, что сопротивление постоянному току круглых и квадратных проводников останется неизменным. На рис. 3 показан переход от квадратного к круглому поперечному сечению проводников.

Площадь поперечного сечения квадратного провода составляет

$$S_s = h^2, \quad (5)$$

а площадь поперечного сечения круглого провода равна

$$S_o = \pi \cdot \left(\frac{D_w}{2}\right)^2, \quad (6)$$

где  $D_w$  — диаметр проводника и равен  $d$ .

Следовательно, приравнявая области  $S_s$  и  $S_o$ , можно получить

$$h^2 = \pi \cdot \left(\frac{D_w d}{2}\right)^2, \quad (7)$$

$$h = D_w \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4}} = \frac{D_w \cdot \sqrt{\pi}}{2}, \quad (8)$$

$$Q = \frac{h}{D_{\text{PEN25}}} \cdot \sqrt{\frac{h}{p}} = \frac{h}{D_{\text{PEN25}}} \cdot \sqrt{\eta}, \quad (9)$$

где  $Q$  — площадь поперечного сечения проводника обмотки, перпендикулярного направлению тока,  $p$  — расстояние между центрами соседних обмоток вокруг проводников в одном и том же слое,  $\eta$  — это коэффициент пористости,  $D_{\text{pen25}}$  — глубина скин-слоя на используемой частоте тока.

$$D_{\text{PEN25}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot F \cdot \mu_r \cdot \mu_0}}, \quad (10)$$

где  $\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость меди,  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $F$  — частота тока, подаваемого на обмотку,  $\rho$  — удельное сопротивление меди.

Если площади поперечного сечения квадратного и круглого проводов одинаковы, то сопротивления постоянного тока обеих обмоток одинаковы. Замена (8) на (9) дает

$$Q = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{D_w}{D_{\text{PEN25}}} \sqrt{\frac{D_w}{p}}, \quad (11)$$

$$K_{\text{AC1}} = Q \cdot \left(\frac{\sinh(2 \cdot Q) + \sin(2 \cdot Q)}{\cosh(2 \cdot Q) - \cos(2 \cdot Q)}\right) + \frac{N_{\text{half1}}^2 - 1}{3} \cdot \frac{\sinh(Q) - \sin(Q)}{\cosh(Q) + \cos(Q)} \cdot Q. \quad (12)$$

Из данной формулы  $K_{\text{AC1}}$  является коэффициентом отношения переменного сопротивления  $R_{\text{AC1}}$  к сопротивлению на постоянном токе  $R_{\text{half1}}$

$$R_{\text{AC1}} = K_{\text{AC1}} \cdot R_{\text{half1}}. \quad (13)$$

Используя выражения (4), (12), (13), находятся также  $R_{AC2}$ ,  $R_{half2}$ , и  $R_{AC2}$  для другой части обмотки.

Общее сопротивление всей катушки вычисляется путем суммирования сопротивлений частей по переменному току  $R_{AC1}$  и  $R_{AC2}$

$$R_{AC} = R_{AC1} + R_{AC2}. \quad (14)$$

Используя формулы (1 - 14), в программе Smath Studio был составлен алгоритм для автоматического нахождения сопротивления обмотки по переменному току, рис. 4.

```

for g ∈ [0..6]
for rer ∈ [1..5]
  F_g_nnn := F_garmon_rer · 10^g Гц
  D_FEM100 := √(ρl / (π · F_g_nnn · μr · ν0))
  Q := (π/4)^(3/4) · (diam_wire / D_FEM100) · √(diam_wire / p)
  K_Rac1 := (Q) · (sh(2·Q) + sin(2·Q) / ch(2·Q) - cos(2·Q)) + 2 · ((Nt1·ch^2) - 1) / 3 · (sh(Q) - sin(Q) / ch(Q) + cos(Q))
  R_a1 := K_Rac1 · R_l_resist_half1
  K_Rac2 := (Q) · (sh(2·Q) + sin(2·Q) / ch(2·Q) - cos(2·Q)) + 2 · ((Nt_half2^2) - 1) / 3 · (sh(Q) - sin(Q) / ch(Q) + cos(Q))
  R_a2 := K_Rac2 · R_l_resist_half2
  R_ac := R_a1 + R_a2
  Rac_nnn_1 := F_garmon_rer · 10^g
  Rac_nnn_2 := R_ac / Q
  nnn := nnn + 1
  
```

Рис. 4

На основе написанного алгоритма был построен график зависимости сопротивления от частоты, рис. 5.

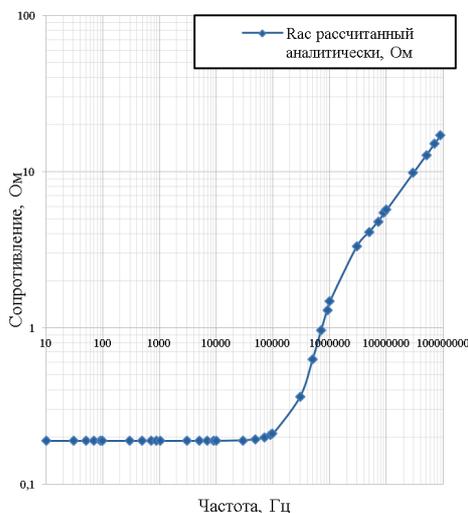


Рис. 5

### Построение модели в FEMM

Используемая программа FEMM моделирует плоские или осесимметричные электромагнитные (или тепловые) поля МКЭ, имеет простой интерфейс, будет использована для решения данной задачи. Используя размеры каркаса ферритового сердечника и сечения изолированной проволоки, была составлена осесимметричная модель, рис. 2. Для постановки осесимметричной задачи нужно определить половину поперечного сечения, так как FEMM рассчитывает вклад двумерного поля и вычисляет уже суммарную картину, созданную телом вращения данного сечения. Затем задаются параметры материалов составных частей и параметры окружающей среды. Необходимо также указать наименование электрической цепи и указать амплитудное значение тока. В нашей задаче используется переменный синусоидальный ток величиной 0,707А и частотой 20000Гц.

После этого производится расчет электромагнитного поля, картины поля можно увидеть на рис. 6 - 8.

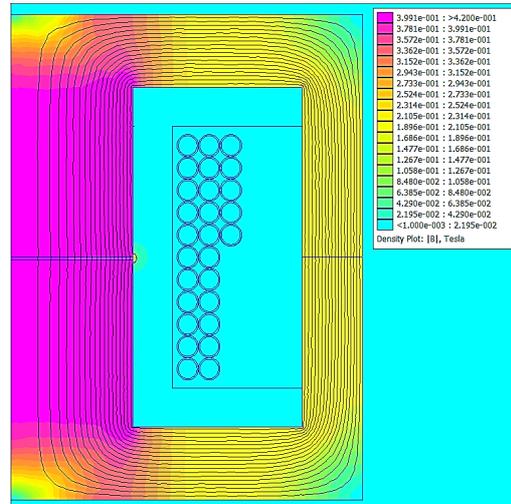


Рис. 6

На рис. 6 можно увидеть плотность магнитной индукции в сердечнике и в зазоре. Отчетливо видно проявление эффекта близости и эффекта выпячивания магнитного поля в зазоре рис. 7.

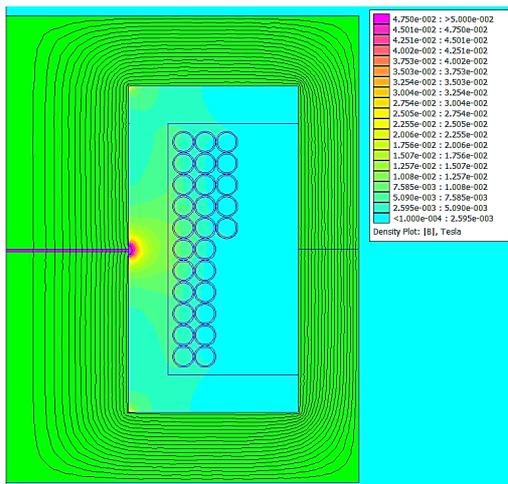


Рис. 7

Наибольшая плотность тока достигается на первом слое катушки, плотность тока распределяется неравномерно по горизонтали от поверхности, близкой к оси симметрии и центра проводника, а также от центра и до противоположной стороны. Данное явление вызвано выталкиванием носителей электрического тока магнитным полем в эти области проводника, рис. 8.

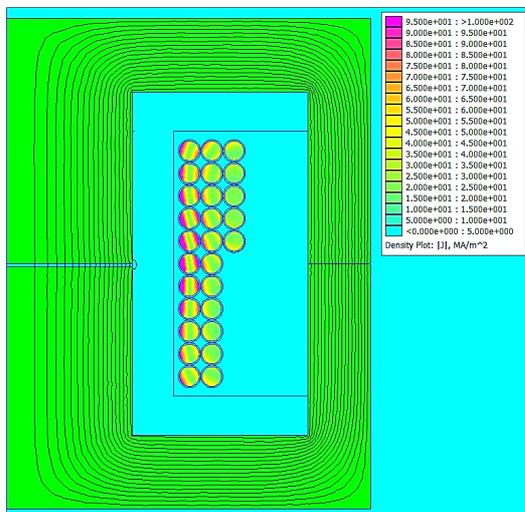


Рис. 8

Данные картины полей представлены только для тока одной частоты, поэтому чтобы построить зависимость сопротивления обмотки дросселя от частоты тока, был написан скрипт управления данной программой на языке LUA, часть данного скрипта изображена на рис. 9(а, б).

---Определение функции расчета и задача параметров расчета

```
function funcSolver(F_garmon,Gar_nom,I)
----определения расчетчика-----
mi_probdef(F_garmon, "millimeters", "axi", 1e-008, 1, 30, 0)
```

```
mi_saveas("C:\Users\Admin\Downloads\ER7_5_5_8_temp\Gar_nom..FEM")
```

```
mi_seteditmode("blocks")
mi_createmesh()
mi_analyze(1)
mi_loadsolution()
mo_seteditmode("area")
```

```
n=0
m=0
mo_clearblock()
for i=1,26 do
    n=XER2[i]
    m=YER2[i]
    mo_selectblock(((1.75+((n*2-1)*0.1)+(n*2-1)*0.015),(-1.35+((m*2-1)*0.1)+(m*2-1)*0.015))
```

```
end
Pr_loss= mo_blockintegral(4)
mo_clearblock()
c,V,Fl = mo_getcircuitproperties("New Circuit")
Resist=V/c
mo_close()
End
```

а)

```
nnn=0
opfile=openfile("C:\Users\Admin\Downloads\results_oc.txt", "w+")
I=0.707
F_garmon={10,30,50,70,90}
for g=0,6 do
    for rer=1,5 do
        F_g=(F_garmon[rer])*10^g
        Garmonic=F_g
        funcSolver(F_g,Garmonic,I)
        print("F_g="..F_g..";
Resist="..Resist.."; Power losses="..Pr_loss)
        nnn=nnn+1
        write(opfile,nnn,"\t",F_g,"\t",Resist,"\t",Pr_loss,"\t",nnn)
    end
end
```

```
closefile(opfile)
funcSolver(F_g,Gar_nom,I)
---Вывод вектора результата-----
opfile=openfile("C:\Users\Admin\Downloads\results_oc.txt", "w+")
n=0
c,V,Fl,ur= mo_getcircuitproperties("New Circuit")
print("Pr_loss="..c.." ..Fl.." ")
write(opfile,n,"\t",V,"\t",Fl,"\t",nn)
closefile(opfile)
```

б)

Рис. 9

Автоматизировав задание начальных параметров расчетов и анализ полученных данных, была получена искомая зависимость, которую можно увидеть на рис. 10, также на нем отражены данные, полученные аналитически с помощью формулы Доуэлла.

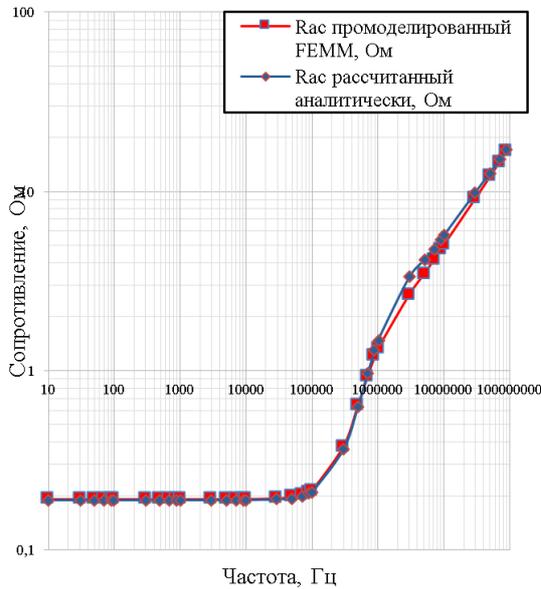


Рис. 10

Рассмотрев полученные данные, можно увидеть, что относительное отклонение расчетных данных от модели до частоты тока в дросселе в 1МГц не превышает 5%. На частотах от 1МГц до 10МГц достигается максимальное отклонение расчетных данных, равное 25%. График относительного отклонения расчетных данных от построенной модели в зависимости от частоты изображен на рис. 11.

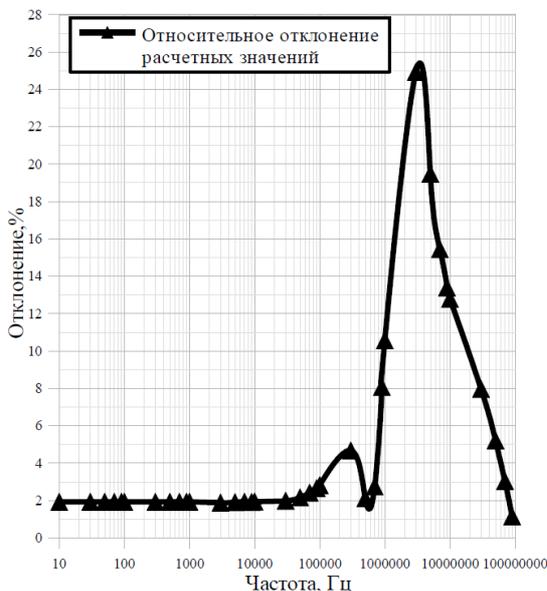


Рис. 11

## Заключение

Используемая методика, состоящая из аналитических вычислений и дополненная МКЭ, помогла найти высокочастотные потери в обмотке, вызванные эффектом близости, а также построить график зависимости сопротивления от частоты, что, в свою очередь, поможет подобрать частотный режим работы дросселя или позволит сделать вывод, что данная намотка не подходит для дальнейшей работы. Данная методика поможет уже на этапе проектирования намотки отказаться от большого числа макетов дросселей и от огромной работы, связанной с измерением их характеристик. Возможность автоматизации расчетов ускорит разработку новых силовых приборов. Нужно также отметить, что используемое программное обеспечение с открытым исходным кодом, и это в значительной мере снижает затраты на приобретение программного обеспечения как для предприятий, так и для учебных заведений.

При анализе любых работ, посвящённых нахождению потерь вследствие эффекта близости, очевидным становится правило: нужно располагать проводники как можно дальше от сильных высокочастотных магнитных полей. Этого можно достичь несколькими способами. Самый простой – уменьшить количество слоёв. Это чрезвычайно важно для дросселей со значительной переменной составляющей тока в обмотке. Если конструкция дросселя не позволяет ограничиться одним слоем из-за требуемого числа витков, нужно оптимизировать сечение провода для достижения оптимального соотношения сопротивления по переменному току к активному сопротивлению обмотки. Точных формул для различных переменных токов нет, поэтому лучше использовать формулу Доуэлла определения потерь вследствие эффекта близости и МКЭ для нахождения необходимого баланса для конструкции разрабатываемого изделия.

Есть также множество других проблем, связанных с эффектом близости, таких как кольцевой эффект, выпячивание поля из зазора магнитопровода, разные формы сечения проводников, которые, в свою очередь, ещё больше усложняют разработкумоточных изделий.

## Литература

1. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2005. 335 с.
2. Dowell P.L. Effect of Eddy Currents in Transformer Windings. IEE Proc., 1966. Pp. 1387 – 1394.

3. Carsten B. High Frequency Conductor Losses in Switchmode Magnetics. HFPC '86 Record, Virginia Beach, VA, 1986. pp. 155-176.
4. Lloyd H., Dixon Jr. Eddy Current Losses in Transformer Windings and Circuit Wiring // Magnetics Design Handbook. 2000. Topic R2. TI Literature No. SLUP132
5. Ridley R. Proximity Loss in Magnetics Windings // Switching Power Magazine. 2005. №. 8. pp. 2–9.
6. Kazimierczuk M.K. High-Frequency Magnetic Components. John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 508 p.
7. Bennett E., Larson S.C. Effective Resistance to Alternating Currents of Multilayer Windings // Electrical Engineering. 1940. Vol. 59. Pp. 1010 — 1016.
8. Billings K., Morey T. Switchmode Power Supply Handbook. Third Edition — McGraw-Hill Companies, 2011. pp. 3.95–3.103.
9. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 8: Электродинамика сплошных сред. 4-е изд., стереотип. М.: Физматлит, 2005. 652 с.
10. Hurley W.G., Gath E., Breslin J.G. Optimizing the AC Resistance of Multilayer Transformer Windings with Arbitrary Current Waveforms // IEEE Transactions on Power Electronics. 2000. Vol. 15. № 2. Pp. 369 – 376.
11. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 2: Теория поля. 6-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1973. 504 с.
12. McLyman C.Wm.T. Transformer and Inductor Design Handbook. Third Edition — New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. 556 p.
13. Vandellac J.P., Zoigas P.D. A Novel Approach for Minimizing High-Frequency Transformer Copper Losses // IEEE Transactions on Power Electronics. 1988. Vol. 3. № 3. Pp. 266 – 277.
14. Picard J. Under the Hood of Flyback SMPS Designs // Texas Instruments Power Supply Design Seminar. 2010. 41 p.
15. ER Cores // ACME. URL: <https://www.acme-ferrite.com.tw/en/images/pro/ERcores.pdf> (дата обращения: 11.04.2021)

Поступила 11.11.2021; принята к публикации 16.12.2021

#### Информация об авторах

**Моисеенко Алексей Алексеевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: amoisei@gmail.com  
**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-616>

## METHOD OF FINDING LOSSES IN THE THROTTLE WINDING AS A RESULT OF THE SKIN EFFECT AND THE PROXIMITY EFFECT

A.A. Moiseenko, S.M. Fyedorov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** here we present a method for using computational methods and modeling magnetic fields in two-dimensional space to find high-frequency losses in the winding of winding products, such as a choke or transformer. We analyzed the literature on this topic, as well as the issue of optimization and adaptation of analytical formulas for the case of using round-section conductors and winding having a non-uniform distribution of layers in the core window. We discussed the analytical finding of the length of the winding wire of the winding with a different number of layers and a variable number of turns used in this case. To automate the calculation using formulas, we wrote a script that builds the dependence of the resistance to alternating current relative to the frequency using analytical formulas. In addition, we wrote a program for automatically setting the initial conditions and boundary values of the modeling parameters, the process of modeling electromagnetic fields itself, analyzing the data obtained, as well as forming an array for plotting the resulting dependence of resistance on frequency. This method uses freely distributed software for both mathematical calculations and modeling of electromagnetic fields. The result of this work was a comparison of the results obtained, which showed good convergence and continuity of the stages of this method

**Key words:** proximity effect, finite element method (FEM), FEMM, skin effect, Smath Studio, Dowell formula

#### References

1. Bul' O.B. "Methods of calculation of magnetic systems of electric devices" ("Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov"), textbook, Moscow: Akademiya, 2005, 335 p.
2. Dowell P.L. "Effect of eddy currents in transformer windings", *IEE Proc.*, 1966, pp. 1387-1394.
3. Carsten B. "High frequency conductor losses in switchmode magnetics", *HFPC '86 Record*, Virginia Beach, VA, May 1986, pp.155-176
4. Lloyd H., Dixon L.H., Eddy Jr. "Current losses in transformer windings and circuit wiring", magnetics design handbook, 2000, topic R2, TI Literature no. SLUP13.
5. Ridley R. "Proximity loss in magnetics windings", *Switching Power Magazine*, 2005, no. 8, pp. 2–9.
6. Kazimierczuk M. "High-frequency magnetic components", John Wiley & Sons, Ltd, 2009, 508 p.

7. Bennett E., Larson S.C. “Effective resistance to alternating currents of multilayer windings”, *Electrical Engineering*, 1940, vol. 59, pp 1010-1016.
8. Billings K., Morey T. “Switchmode power supply handbook”, McGraw-Hill Companies, 2011, pp. 3.95–3.103.
9. Landau L.D., Livshits E.M. “Theoretical physics vol. 8: Electrodynamics of continuous media”, Moscow: Fizmatlit, 2005, 652 p.
10. Hurley W.G., Gath E., Breslin J.G. “Optimizing the AC resistance of multilayer transformer windings with arbitrary current waveforms”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 369-376.
11. Landau L.D., Livshits E.M. “Theoretical physics vol. 2: Field theory”, Moscow: Nauka, 1973, 504 p.
12. McLyman C.Wm.T. “Transformer and inductor design handbook”, New York: Marcel Dekker, Inc., 2004, 556 p.
13. Vandaelac J.P., Zoigas P.D. “A novel approach for minimizing high-frequency transformer copper losses”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1988, vol. 3, no. 3, pp. 266-277.
14. Picard J. “Under the hood of flyback SMPS designs”, *Texas Instruments Power Supply Design Seminar*, 2010, 41 p.
15. ER Cores, ACME, available at: <https://www.acme-ferrite.com.tw/en/images/pro/ERcores.pdf> (date of access: 11.04.2021)

Submitted 11.11.2021; revised 16.12.2021

#### Information about the authors

**Aleksey A. Moiseenko**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: amoisei@gmail.com

**Sergey M. Fyedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: Fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ КАЛИБРОВКИ КОМПЛЕКСА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

Д.А. Пухов, А.В. Суворин, Д.В. Васильченко, М.А. Ромашенко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в современном мире при стремлении человечества к миниатюризации электротехнической и радиоэлектронной продукции без потери технических характеристик устройств, наряду с их расширением одной из значимых проблем является влияние электромагнитных помех на стабильное функционирование устройств. Представлены модули калибровки, используемые в программно-аппаратном комплексе (ПАК), который позволяет произвести оценку влияния электромагнитных помех (ЭМП) на электронные средства. Практическое искажение сигналов неизбежно, так как причиной помех может стать взаимное влияние элементов печатной платы (ПП) друг на друга, а также конфигурация самого рисунка дорожек ПП и её топологии. Рассматриваются модули, позволяющие выявить ряд ошибок по ранее полученным результатам и обеспечить калибровку комплекса с целью повышения точности оценки влияния самоиндукции и импеданса линии передач на вносимые искажения сигнала при различных конфигурациях трассировки печатной платы. Применение данного программно-аппаратного комплекса позволяет значительно сократить время, необходимое на разработку устройства и комплекс испытаний, что, в свою очередь, снижает финансовую нагрузку на выпуск единицы продукции, поскольку позволяет выявить недостатки устройств на стадии макетирования электротехнической продукции

**Ключевые слова:** печатная плата, электромагнитные помехи, импеданс передачи, электромагнитная совместимость, модули калибровки

### Введение

Широкое распространение электроники и ее миниатюризация приводят к необходимости учитывать возможные проблемы в области электромагнитной совместимости (ЭМС) на всех стадиях проектирования и эксплуатации электронных изделий. Для получения данных о работе того или иного устройства необходимо заранее учитывать совместную работу элементов. Причиной помех может стать их взаимное влияние друг на друга, а также конфигурация самого рисунка платы что, в свою очередь, приводит к увеличению себестоимости готового продукта. Это обусловлено повторной диагностикой выпущенного продукта для выявления и исправления ошибок, допущенных в процессе разработки печатной платы. На данную операцию может уходить большое количество времени и ресурсов. Таким образом, целесообразно применение унифицированных средств для осуществления калибровки измерительного и испытательного оборудования. К таким средствам можно отнести ПАК для оценки влияния ЭМП на электронные средства. Для увеличения точности определения ошибок при трассировке ПАК снабжен набором модулей калибровки с раз-

личными видами конфигураций расположения элементов и дорожек. Подобные модули позволяют выявить ряд ошибок по ранее полученным результатам и выполнить калибровку ПАК с учётом их конфигураций. Применение самого ПАК значительно сокращает время разработки, поскольку позволяет провести предварительные испытания еще на стадии макетирования. Каждый последующий эксперимент может отличаться от предыдущего фоновыми помехами, а также различными паразитными излучениями, для повышения точности измерений и определения причины некорректной работы устройства необходимо производить периодическую калибровку измерительной системы ПАК. В связи с этим был разработан и изготовлен набор модулей калибровки, позволяющий произвести отстройку комплекса по различным параметрам перед проведением испытаний.

### Модуль калибровки, учитывающий закон Ленца

В современном мире частота синхронизации уже давно превысила отметку в 500 МГц, что привело к появлению на кристаллах микросхем и печатных платах заметных индуктивных эффектов, способных отрицательно влиять на целостность передаваемого сигнала

и ЭМС печатного узла. Индуктивность является одним из важнейших параметров, определяющих целостность сигнала и уровень электромагнитных помех, создаваемых в элементах, находящихся на печатной плате. Особенно важным в цепях с высокочастотными сигналами является моделирование абсолютно всех индуктивных связей. Для того чтобы обеспечить снижение индуктивных эффектов, необходимо обеспечить наиболее верный путь возврата высокочастотных токов. Данная задача сложна как для инженеров любого уровня, так и специализированного ПО. Это связано с высокой сложностью решаемой задачи и её зависимостью от большого количества факторов. Для схем, критичных к индуктивным эффектам, существуют ряд разработанных «стандартов», которые учитываются разработчиком при проведении трассировки печатных плат. Наиболее общая рекомендация сводится к расположению рядом сигнального и возвратного проводника, т.к. чем ближе они располагаются, тем меньше их суммарная индуктивность, что положительно влияет на передачу сигнала по такой линии. При конструировании интегральных микросхем эти технические решения видоизменяются, но их физическая суть остается неизменной.

Одним из видов индукционных помех является подскок напряжения заземления. Данное явление заключается в создании коммутационных помех и радиопомех, связанных с эффективной индуктивностью возвратного проводника. Также существуют помехи, создаваемые эффективной индуктивностью части контура. Для предотвращения брака при производстве ПП разработан модуль калибровки для отладки ПАК на отслеживание возникновения помех при различных вариантах трассировки печатных проводников.

Разработанный модуль предназначен для калибровки ПАК с целью определения помех в печатных проводниках по причине возникновения влияния закона Ленца. Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея при изменении магнитного потока “Ф”, пронизывающего электрический контур, в нём возбуждается ток, называемый индукционным.

Вместо гибкого провода на плате размещены дорожки с различной конфигурацией, по которым токи идут по пути наименьшей индуктивности. Если индуктивность высокая, потребуется больше времени для достижения установившегося состояния тока после скачка напряжения на соединении источника. При

трассировке на широком заземлении переход практически мгновенный. На рис. 1 представлен внешний вид разработанного модуля калибровки.

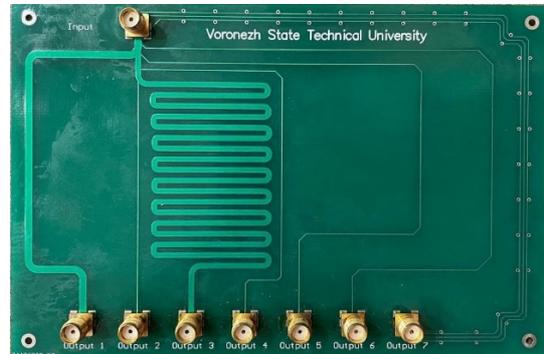


Рис. 1. Печатная плата, демонстрирующая закон Ленца

Модуль имеет один входной разъем ( $U_{in}$ ) и семь выходных разъемов ( $U_{out1}$  -  $U_{out7}$ ). В ходе проведения калибровки была произведена подача эталонного сигнала на вход модуля и фиксация выходного по 1, 3, 5, 6 путям прохождения тока (функциональная схема представлена на рис. 2). В результате были получены графики зависимости входного и выходного напряжений. В процессе испытаний модуль устанавливается в ПАК, все данные эксперимента заносятся в базу данных ПАК с их последующим анализом и сохранением в базу данных.

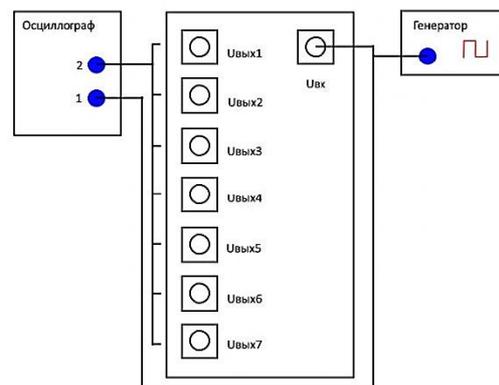


Рис. 2. Функциональная схема соединения осциллографа и генератора с платой

Результаты сравнения  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  во временной области для 5 выходов 1, 3, 5, 6 и 7 показаны на рис. 3 – 7.

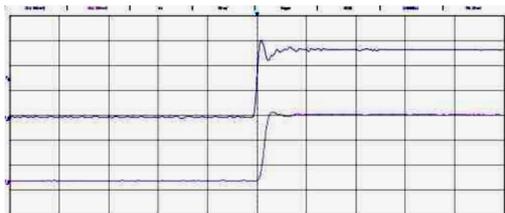


Рис. 3. Сравнение с входом 1



Рис. 4. Сравнение с входом 3

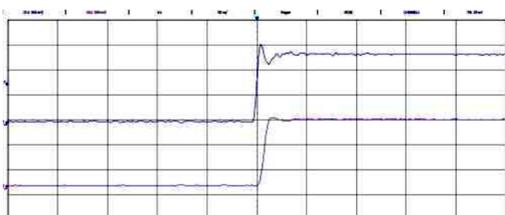


Рис. 5. Сравнение с входом 5



Рис. 6. Сравнение с входом 6

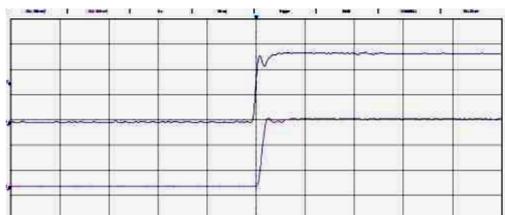


Рис. 7. Сравнение с входом 7

Полученные результаты заносятся в базу данных ПАК. В процессе испытаний ПАК может сделать вывод о наличии неверной трассировки, а также он способен указать конкретный тип и ориентировочную длину участка, основываясь на данных, полученных при калибровке. Также производится выдача рекомендаций по доработке исследуемой печатной платы. Как правило, разработчик, занимающийся трассировкой печатной платы, должен

предоставить наиболее близкий путь, вследствие того, что возвратные токи проходят как можно ближе к пути прохождения сигнала. Кроме того, из сравнения трасс 5, 6 и 7 на рис. 5, 6 и 7, соответственно, следует отметить, что трассу лучше прокладывать в середине широкой плоскости земли (трасса 6), а не на краю (трасса 5) и еще лучше окружить трассу защитным (заземленным) слоем (трасса 7).

### Модуль калибровки для исследования импеданса передачи

Волновое сопротивление, или импеданс, - это сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении вдоль любой однородной (то есть без отражений) направляющей системы, в том числе и витой пары.

Одним из ярких проявлений импеданса является возникновение возвратного тока в линиях передачи. В быстродействующих системах стоит предусматривать влияния тока возврата, так как любое его возмущение будет вызывать повышение индуктивности контура, что будет приводить к появлениям помех в сигнальном токе и нарушать целостность сигнала. Из этого следует, что при формировании пути обратного тока необходимо учитывать минимальное изменение индуктивности проводников.

Разработанный модуль позволяет произвести исследование данного явления путем измерения  $ZT$  при использовании различных кабелей. Модуль для калибровки на импеданс передачи показан на рис. 8. Представленный модуль позволяет исследовать сопротивление передачи при использовании различных кабелей. Калибровка осуществляется на ПАК с использованием анализатора спектра с генератором слежения.

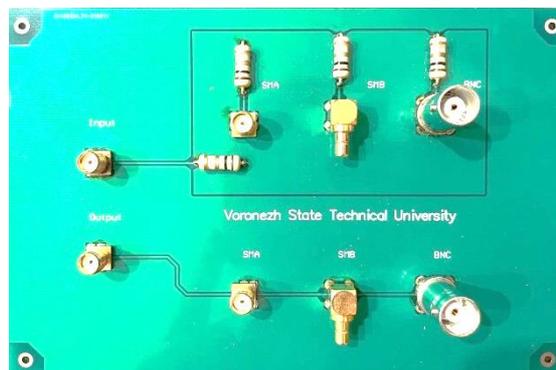


Рис. 8. Модуль для исследования импеданса передачи

Представленный модуль позволяет исследовать сопротивление передачи при использовании различных кабелей. Калибровка осуществляется на ПАК с использованием анализатора спектра с генератором слежения.

Образец кабеля подключается к двум противоположным разъемам, как показано на рис. 5. Выход следящего генератора подключается к входу, а анализатор спектра подключается к выходу. Сам анализатор спектра передает данные на ПАК посредством канала передачи данных. Схема подключения представлена на рис. 9.

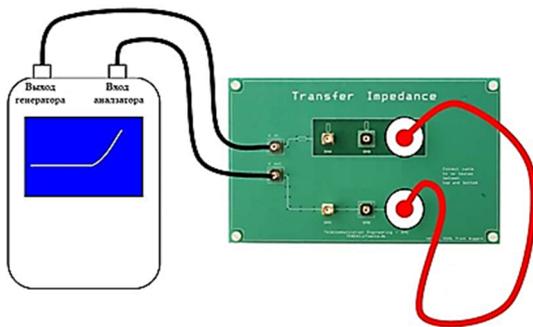


Рис. 9. Схема подключения

Ток подается с генератора с частотой 50 – 100 МГц. Результат исследования представлен на рис. 10.

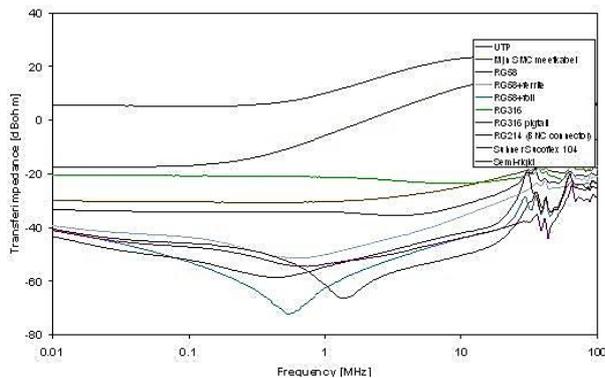


Рис. 10. Результат исследования

Полученные результаты также загружаются в память ПАК, который может выявить, генерируют ли кабели шумовые напряжения дифференциального режима из-за чувствительных токов через свои обратные проводники, и указать требуемое сопротивление передачи для своих конструкций кабелей в соответствующем частотном диапазоне.

### Заключение

Разработанные модули калибровки позволяют произвести необходимые настройки ПАК перед проведением испытаний. Занесенные в базу данных калибровочные значения ускоряют работу ПАК и повышают точность определения дефектов трассировки, что положительно влияет на скорость дефектовки и снижает затраты на её проведение. Применение разработанных модулей калибровки совместно с ПАК позволят снизить как временные, так и материальные затраты на проектирование и выпуск электротехнической продукции.

### Литература

1. Ромашенко М.А., Васильченко Д.В., Рожненко С.Н. Методика оценки влияния электромагнитных помех на функционирование электронных средств в процессе их проектирования // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 6. С. 57-61.
2. Васильченко Д.В., Неклюдов А.Л., Ромашенко М.А. Программно-аппаратный комплекс тестирования электронных средств на воздействие электромагнитных помех // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXVI Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2020. С. 386-391.
3. Пат. на полезную модель RU 189820 U1. Сканер ближнего электрического поля для двухсторонних и многослойных печатных плат/ Ромашенко М.А., Васильченко Д.В., Неклюдов А.Л., Глотов В.В., Глотова Т.С. 05.06.2019. Заявка № 2019108722 от 26.03.2019.
4. Методика формирования испытательных сигналов для оценки устойчивости электронных средств к ЭМП/ М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, С.Н. Рожненко, Ю.С. Балашов // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 6 (12). С. 19-23.

Поступила 13.10.2021; принята к публикации 15.12.2021

### Информация об авторах

- Пухов Дмитрий Анатольевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: puhov.dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>
- Суворин Алексей Валерьевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: suvorin.av@mail.ru
- Васильченко Дмитрий Владимирович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Shadow951@bk.ru
- Ромашенко Михаил Александрович** – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kipr@vorstu.ru

## DEVELOPMENT OF CALIBRATION MODULES FOR A COMPLEX OF ASSESSING THE IMPACT OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ON ELECTRONIC DEVICES

**D.A. Pukhov, A.V. Suvorin, D.V. Vasil'chenko, M.A. Romashchenko**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** in the modern world, with the desire of all mankind to miniaturize electrical products without loss of power, one of the significant problems is the influence of electromagnetic interference on the stable functioning of devices. This article presents the calibration modules used in the software and hardware complex (SHC), which allows one to assess the influence of electromagnetic interference (EMI) on electronic means. The practical distortion of signals is inevitable since the cause of interference can be their mutual influence on each other, as well as the configuration of the printed circuit board pattern itself. The paper considers modules that allow identifying a number of errors based on previously obtained results and providing calibration of the complex in order to increase the accuracy of estimating the effect of self-induction and transmission line impedance on the introduced signal distortion in various configurations of the PCB trace. The use of this software and hardware complex can significantly reduce the development time and conduct tests that require financial costs since it allows one to conduct a number of experiments at the stage of prototyping electrical products

**Key words:** printed circuit board, electromagnetic interference, transmission impedance, electromagnetic compatibility, calibration modules

### References

1. Romashchenko M.A., Vasil'chenko D.V., Romanenko S.N. "Methodology for assessing the influence of electromagnetic interference on the functioning of electronic means in the process of their design", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 57-61.
2. Vasil'chenko D.V., Neklyudov A.L., Romashchenko M.A. "Software and hardware complex for testing electronic means for the effects of electromagnetic interference", *Proc. of the XXVI Int. Sci. and Tech. Conf.: Radar, Navigation, Communication (Radio-lokatsiya, navigatsiya, svyaz')*, 2020, pp. 386-391.
3. Romashchenko M.A., Vasil'chenko D.V., Neklyudov A.L., Glotov V.V., Glotova T.S. "Near-field scanner for double-sided and multilayer printed circuit boards" ("Skaner blizhnego elektricheskogo polya dlya dvukhstoronnikh i mnogosloynnykh pechatnykh plat"), patent application 2019108722, RU 189820 U1, 05.06.2019, dated 26.03.2019.
4. Romashchenko M.A., Vasil'chenko D.V., Romanenko S.N., Balashov Yu.S. "Methodology for forming test signals for assessing the stability of electronic means to EMF", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2020, vol. 84, no. 6 (12), pp. 19-23.

Submitted 13.10.2021; revised 15.12.2021

### Information about the authors

**Dmitriy A. Pukhov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [puhov.dm22@yandex.ru](mailto:puhov.dm22@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

**Aleksey V. Suvorin**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [suvorin.av@mail.ru](mailto:suvorin.av@mail.ru)

**Dmitriy V. Vasil'chenko**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [Shadow951@bk.ru](mailto:Shadow951@bk.ru)

**Mikhail A. Romashchenko**, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru)

## МНОГОЛУЧЕВАЯ АНТЕННАЯ СИСТЕМА УКВ-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ЛИНЗЫ ИЗ ГРАНИТНОГО ЩЕБНЯ

В.И. Николаев<sup>1</sup>, Ю.Г. Пастернак<sup>1,2,3</sup>, В.А. Пендюрин<sup>3</sup>, С.М. Фёдоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** предложена конструкция приземной многолучевой антенной решетки на основе линзы из гранитного щебня, позволяющая одновременно формировать до нескольких десятков лучей в длинноволновой области УКВ-диапазона волн. Эффективная диэлектрическая проницаемость гранитного щебня оценивалась с помощью формулы Лихтенкера для мелкодисперсных смесей; ее величина приблизительно равна 3. Для оценки величины замедления поверхностных волн в линзе использовалась методика анализа дисперсионных характеристик зеркального диэлектрического волновода; при высоте линзы 1.8 метра эффективная диэлектрическая проницаемость эквивалентного зеркального диэлектрического волновода равна 2.1. В качестве облучателей линзы - несимметричные электрические вибраторы, расположенные на окружности по периметру линзы, диаметр которой составляет 30 метров; диаметр подстилающей стальной поверхности составляет 40 метров. Предложенная антенная система характеризуется потерями в щебне около 3 дБ при диаметре линзы около 3,8 длин волн; показано, что коэффициент направленного действия у каждого луча может составлять около 15,5 дБ, при ширине главного лепестка в азимутальной плоскости по уровню половинной мощности около 10 градусов

**Ключевые слова:** приземная антенна, линзовая антенна, многолучевая антенная система

### Введение

Интернет подземных вещей является естественным продолжением интернета вещей под землей. Интернет подземных вещей состоит из подземных сенсоров, которые могут использоваться в точном земледелии [1-3], в патрулировании границ, мониторинге состояния трубопроводов и окружающей среды [4-6], в виртуальных ограждениях [7]. Существует несколько проблем при разработке антенны, подходящей для подземной связи. В частности, входное сопротивление подземной антенны зависит от свойств почвы, влажности почвы, рабочей частоты и глубины размещения [8].

Также, несмотря на интенсивные исследования в области беспроводной подземной связи [7], увеличение дальности связи остается серьезной проблемой. Для увеличения дальности связи требуется разработать усовершенствованные методы, использующие уникальные особенности беспроводной связи под землей. Например, существенно влияют на качество связи под землей свойства почвы и ее влажность [2]. Также, подземная антенна должна быть способна сосредоточивать максимальное

количество энергии в каком-то одном направлении. Поэтому использование фиксированных направленных антенн с высоким коэффициентом усиления [9], которые не имеют возможности динамически управлять лучом, не позволяет создать высокоэффективную систему связи с подземными объектами.

Эмпирические исследования показали, что конструкции антенн, разработанных с учетом дисперсии в почве и отражений от границы почва-воздух, позволяют увеличить дальность связи до 5 раз по сравнению с конструкцией антенны, разработанной с учетом только изменения длины волны в почве [10]. Для увеличения дистанции связи с подземными и надземными устройствами может использоваться технология адаптивного диаграммообразования в зависимости от влажности почвы [3]. В работе [11] предложено использовать изменяющуюся поляризацию для борьбы с потерями при распространении сигнала в подземных тоннелях. Суть метода заключается в разбиении всего пути распространения сигнала на зоны и оценке оптимальной поляризации волны, обеспечивающей наименьшие потери.

В статье [12] исследуется рамочная антенна для обеспечения связи сквозь землю в случае завала шахты. Характеристики канала связи были получены для различных случаев распо-

ложения антенн под землей. Исследования показали, что канал вверх обладает меньшей дистанцией действия, чем канал вниз [12]. Для борьбы с этой асимметрией в работе [13] предложено использовать широкополосные антенны, более устойчивые к изменению длины волны в почве. В работе [14] рассматривается несколько конструкций подземных антенн для диапазона средних волн. Делается вывод об оптимальном выборе антенны для различных задач: организации подвижной связи внутри подземных сооружений, организации стационарной связи, организации двусторонней связи сквозь землю.

В статье [15] предложен метод организации подземной связи на основе магнитной индукции. Экспериментальные исследования показали возможность установления связи под землей на расстоянии до 10 метров с коэффициентом ошибок в пакетах равным 5%.

В данной статье предлагается конструкция многолучевой антенны на основе линзы из щебня мелкой фракции, работающая в диапазоне 30-40 МГц. Данное технологическое решение позволяет преодолеть высокие потери в земле за счет использования множества остронаправленных лучей. При этом для создания линзы используется прочный, легкодоступный и дешевый материал.

### Линза из гранитного щебня для приземной антенны

Общий вид предлагаемой конструкции представлен на рис. 1. Линза представляет собой усеченный конус с диаметром нижнего основания – 30 метров, диаметром верхнего основания – 26 метров, высотой – 2 метра.

Для построения линзы использовались расчетные формулы для сферической линзы [16].

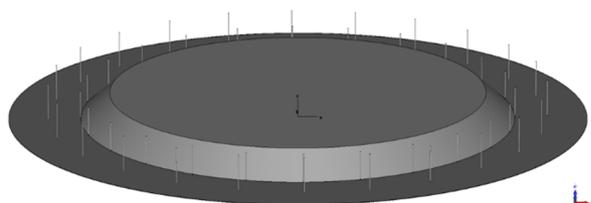


Рис. 1. Общий вид многолучевой антенной решетки на основе линзы из гранитного щебня

Рассмотрим методику определения коэффициента преломления линзы для получения

заданных характеристик антенны. Сечение линзы горизонтальной плоскостью показано на рис. 2. Пусть линза имеет радиус  $R$  и коэффициент преломления  $n$ , а облучатель ее расположен на оси  $X$  в точке  $F$ , отстоящей на расстоянии  $R_0$  от ее центра.

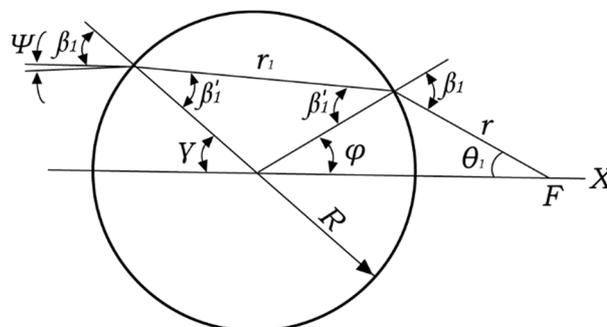


Рис. 2. Сечение линзы горизонтальной плоскостью

Определим коэффициент преломления линзы. Для этого запишем закон Снеллиуса:

$$\sin\beta_1 = n\sin\beta_1' \quad (1)$$

Из рис. 2 видно, что

$$R\sin\varphi = r\sin\theta_1, R_0\sin\varphi = r\sin\beta_1, \quad (2)$$

где  $\theta_1$  – угол выхода луча из фокуса. Отсюда

$$\sin\beta_1 = C\sin\theta_1, \quad (3)$$

$$\sin\beta_1' = C\sin\theta_1/n, \quad (4)$$

где  $C = R_0/R$ .

Из (3) видно, что наибольший угол облучения будет при  $\beta_1 = 90^\circ$ , т.к.  $\theta_{1max} = \arcsin(1/C)$ .

Чтобы луч выходил параллельно оси  $X$ , необходимо выполнение следующих соотношений:

$$\gamma = \beta_1, \beta_1' = \frac{\varphi + \beta_1}{2} = \beta_1 - \frac{\theta_1}{2} = \arcsin(C\sin\theta_1) - \theta_1/2 \quad (5)$$

Зная  $\beta_1'$ , можно теперь определить  $n$  из (4):

$$n = C\sin\theta_1 / \sin[\arcsin(C\sin\theta_1) - \theta_1/2] \quad (6)$$

Формула (6) показывает, что коэффициент преломления зависит от угла выхода луча из

облучателя и, следовательно, не является постоянной величиной.

Для оценки величины  $n$  при малых углах  $\theta_1$  можно воспользоваться равенством (5), которое перепишем в виде  $2\beta_1 - 2\beta_1' - \theta_1 = 0$ . При малых углах  $\theta_1$  синусы можно заменить соответствующими углами и, согласно (3) и (4), положить  $\beta_1 = C\theta_1$ ,  $\beta_1' = C\theta_1/n$ . Следовательно,  $2C - \frac{2C}{n} - 1 = 0$ , откуда коэффициент преломления  $n = 2C/(2C - 1)$ .

Для определения эффективной комплексной диэлектрической проницаемости щепня использовалась формула Лихтенекера [17] для мелкодисперсной смеси двух диэлектриков – частиц гранитного щепня и воздуха:  $\ln(\varepsilon_{эфф}) = x_1 \cdot \ln(\varepsilon_1) + (1 - x_2) \cdot \ln(\varepsilon_2)$ , где  $x_1$  и  $x_2$  – относительные объемные концентрации двух компонентов смеси;  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – относительные диэлектрические проницаемости двух компонентов смеси. Эффективная диэлектрическая проницаемость щепня была принята равной  $\varepsilon_{эфф} = 3$ , а значение тангенса угла диэлектрических потерь на низких частотах УКВ диапазона –  $tg(\delta_d) = 0,02$ .

### Модель распространения ТМ-волны в линзе

Предложенная конструкция линзы является структурой с ТМ-волной. Решения для ТМ волны, распространяющейся по диэлектрику на проводящем экране, можно получить из формул для ТЕ-волны простой заменой  $\mu$  на  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon$  на  $\mu$ ,  $E$  на  $H$  и  $H$  на  $E$  [18]. Используя эту замену, получим выражения для ТМ-волны:

$$H_y = B_1 \cos\left(k_1 x - \frac{n\pi}{2}\right), \quad -d \leq x \leq d; \quad (7)$$

$$H_y = B_0 e^{-jk_0 x}, \quad x > d; \quad (8)$$

$$H_y = (-1)^n B_0 e^{jk_0 x}, \quad x < -d; \quad (9)$$

$$E_x = \frac{\gamma}{j\omega\varepsilon} H_y; \quad (10)$$

$$E_z = \frac{1}{j\omega\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x}, \quad (11)$$

где  $d$  – толщина диэлектрика;

$$0 \leq \left(k_1 x - \frac{n\pi}{2}\right) \leq \frac{\pi}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Приравнявая тангенциальные составляющие полей  $x = d$  или  $x = -d$ , получаем характеристическое уравнение для ТМ<sub>n</sub> волн

$$k_1 \varepsilon_0 tg\left(k_1 d - \frac{n\pi}{2}\right) = jk_0 \varepsilon_1, \quad (12)$$

которое совместно с

$$k_1^2 - \gamma^2 = k^2 \varepsilon_r \quad (13)$$

и

$$k_0^2 - \gamma^2 = k^2 \quad (14)$$

Может быть решено относительно постоянной распространения  $\gamma$ . Из формулы (11) видно, что для структуры в виде диэлектрической пластины на проводящем экране применимы лишь решения с четными  $n = 0, 2, 4, \dots$

Для рассматриваемой структуры низшим типом волны является волна, соответствующая решению с  $n = 0$ , которая обозначается как ТМ<sub>0</sub> волна. Уравнение (12) в этом случае примет вид:

$$k_1 \varepsilon_0 tg(k_1 d) = jk_0 \varepsilon_1. \quad (15)$$

Волна типа ТМ<sub>0</sub> при  $\varepsilon_r > 1$  не имеет отсечки. Если  $\varepsilon_r$  стремится к нулю, то она вырождается в ТЕМ-волну в свободном пространстве. Для высших типов волн существует критическая толщина диэлектрика – в пластине меньшей толщины волна распространяется не будет. То же самое будет наблюдаться и для ТЕ-волны. Критическая толщина пластины определяется выражением

$$2 \frac{d}{\lambda} = \frac{n}{2\sqrt{\varepsilon_r - 1}}, \quad \varepsilon_r > 1. \quad (16)$$

Возбуждение ТМ-волн в структурах в виде диэлектрических пластин конечной протяженности можно осуществить с помощью открытого конца волновода или Н-секториального рупора. Поляризация возбудителя должна быть перпендикулярной поверхности диэлектрической пластины, т.е.  $E = z_0 E_z$ . Диэлектрическая пластина на проводящем экране может быть также возбуждена с помощью одной или нескольких щелей в экране.

В ходе исследования были получены зависимости эффективной диэлектрической проницаемости зеркального диэлектрического волновода в виде слоя гранитного щепня (эффективная диэлектрическая проницаемость для бесконечной среды 3) с подстилающей металлической поверхностью от частоты для разных толщин щепня, рис. 3.

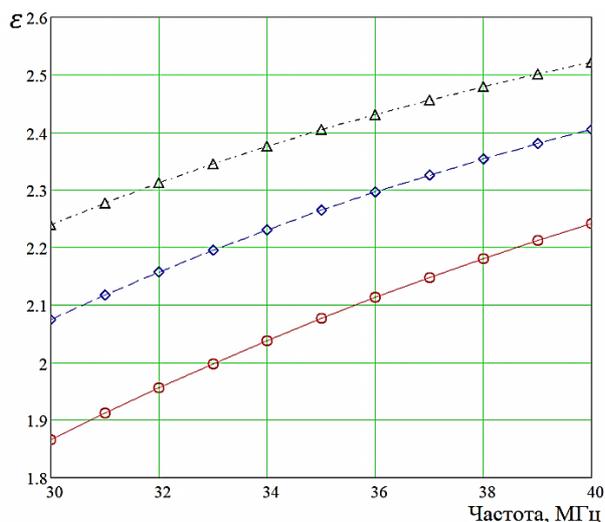


Рис. 3. Зависимости эффективной диэлектрической проницаемости щелна от частоты для следующих толщин щелна: 1,8 метра (линия с кружками); 2,1 метра (линия с ромбами); 2,4 метра (линия с треугольниками)

Как видно из рис. 3, при высоте слоя щелна 1,8 метра на частоте 36 МГц эффективная диэлектрическая проницаемость зеркального диэлектрического волновода примерно равно 2,1, что совпадает с диэлектрической проницаемостью материала фторопласт-4.

### Приземная многолучевая антенна

В качестве облучателей линзы использовались штыри высотой 1.8 метра и расположенные по периметру конуса. На расстоянии 2.25 метра от штырей размещались рефлекторы, замкнутые на землю, высотой 2.5 метра.

Диаметры всех штырей – 50 мм. Всего использовалось 24 пары (активный штырь – рефлектор). Предлагаемая многолучевая антенна способна формировать 24 луча в азимутальной плоскости в секторе от 0 до 360 градусов. В качестве подстилающей поверхности использовался стальной лист диаметром 40 м.

На рис. 4 представлена трехмерная диаграмма направленности при запитке одного штыря и направлении луча под углом 180°. Ввиду симметричности конструкции параметры диаграммы направленности при запитке остальных штырей будут такими же.

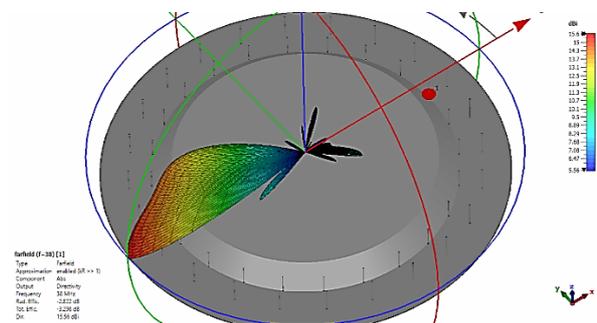


Рис. 4. Трехмерная диаграмма направленности на частоте 38 МГц

На рис. 5 и 6 показаны проекции диаграммы направленности на азимутальную и угломестную плоскость, соответственно. Как видно из рисунков, коэффициент усиления антенны составил 15,6 дБ при ширине главного лепестка по уровню половинной мощности 9,7°, при уровне боковых лепестков не больше 6,5 дБ.

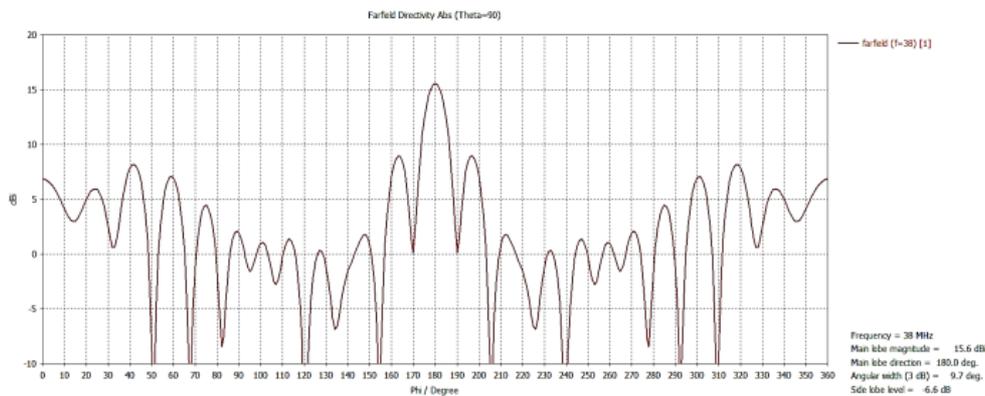


Рис. 5. Проекция диаграммы направленности на азимутальную плоскость, частота 38 МГц

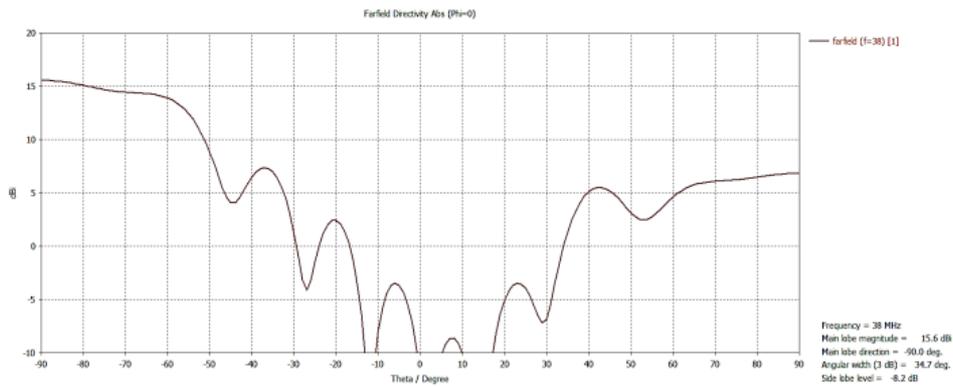


Рис. 6. Проекция диаграммы направленности на угломестную плоскость, частота 38 МГц

Согласование антенны остается приемлемым в диапазоне исследуемых частот и не превышает значения 8 дБ, рис. 7. Как видно из рис.

8, потери в линзе не велики и КПД антенны составляет около 50%.

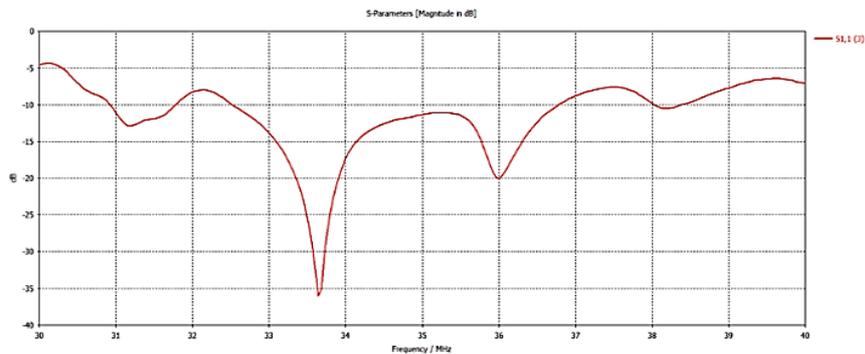


Рис. 7. S-параметры призмной многолучевой антенны

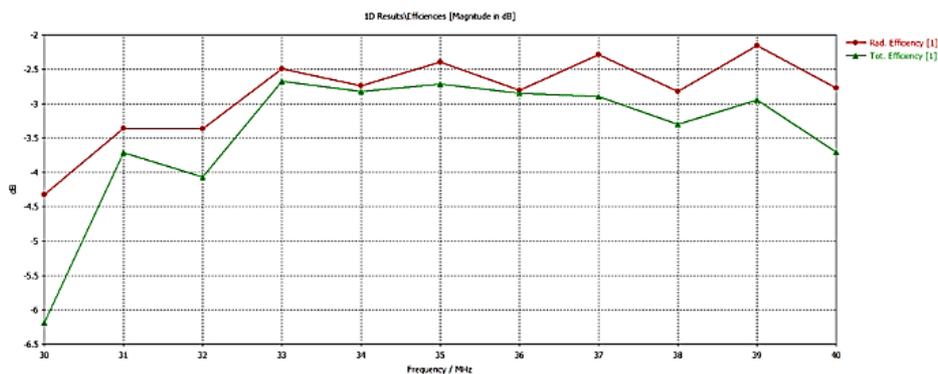


Рис. 8. Графики эффективности призмной многолучевой антенны

### Заключение

Таким образом, в данной статье представлена конструкция призмной многолучевой антенной решетки на основе линзы из щебня, обладающая высокой направленностью и способная формировать 24 луча. Применение в качестве материала изготовления гранитного щебня позволяет добиться высокой прочности конструкции и низкой цены. Формирование множе-

ства лучей позволяет бороться с высокими потерями в почве за счет сосредоточения всей энергии передатчика в необходимом направлении.

### Литература

1. Dong X., Vuran M.C. and Irmak S. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems// in Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11. No 7. pp. 1975-1987

2. Salam A., Vuran M.C. and Irmak S. Pulses in the Sand: Impulse Response Analysis of Wireless Underground Channel: in Proc. of 35<sup>th</sup> IEEE INFOCOM. San Francisco, CA, 2016. pp. 1-9.
3. Salam A., Vuran M.C. Smart Underground Antenna Arrays: A Soil Moisture Adaptive Beamforming Approach: in Proc. of the 36th IEEE INFOCOM 2017. Atlanta, GA, USA, 2017. pp. 1-9.
4. Impact of Rocks and Minerals on Underground Magneto-Inductive Communication and Localization/ T.E. Abrudan, O. Kypris, N. Trigoni and A. Markham // IEEE Access. 2016. Vol. 4. pp. 3999-4010.
5. A new wireless underground network system for continuous monitoring of soil water contents / C.J. Ritsema, H. Kuipers, L. Kleiboer, E. Elsen, K. Oostindie, J.G. Wesseling, J. Wolthuis and P. Havinga// Water Resources Research Journal. 2009. Vol. 45. pp. 1–9.
6. Salam A., Vuran M.C. and Irmak S. Towards Internet of Underground Things in Smart Lighting: A Statistical Model of Wireless Underground Channel: in Proc. of the 14th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (IEEE ICNSC). Calabria, Italy, 2017. pp. 574-579.
7. Akyildiz I.F. and Stuntebeck E.P. Wireless underground sensor networks: Research challenges// Ad Hoc Networks Journal (Elsevier). 2006. Vol. 4. pp. 669–686.
8. Zemmour H., Baudoin G. and Diet A. Soil Effects on the Underground-to-Aboveground Communication Link in Ultrawideband Wireless Underground Sensor Networks: in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2017. Vol. 16. pp. 218-221.
9. Tiusanen M.J. Wideband antenna for underground Soil Scout transmission// IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2006. Vol. 5. No. 1. pp. 517–519.
10. A Theoretical Model of Underground Dipole Antennas for Communications in Internet of Underground Things/A. Salam, M.C. Vuran, X. Dong, C. Argyropoulos & S. Irmak// IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67. № 6 pp.1-15.
11. Optimization of Wireless Communication Coverage in Underground Tunnels Based on Zone Division/ Y. Huo, Q. Hu, Y. Sun, X. Guo, L. Qi, X. Zhao & E. Ding// International Journal of Antennas and Propagation. 2020. pp. 1–15.
12. Antenna arrangement investigation for through-the-earth (TTE) communications in coal mines/ L. Yan, C. Sunderman, B. Whisner, N. Damiano & C. Zhou// IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 2015. pp. 1-6. DOI: 10.1109/ias.2015.7356912
13. Silva A.R. & Vuran M.C. Communication with Aboveground Devices in Wireless Underground Sensor Networks: An Empirical Study// IEEE International Conference on Communications. 2010. pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICC.2010.5502315>
14. Fedosov D.V., Kolesnikov A.V. & Nikolaev A.V. Advanced MF antennas for underground communications// Journal of Physics: Conference Series. 2021. Pp. 1-7. 1862 (2021) 012002 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1862/1/012002.
15. Design and Implementation of Magnetic Induction based Wireless Underground Communication System Supporting Distance Measurement/ M. Kim, S. Chae, Y. Shim, D. Lee, M. Kim, Y. Moon and K. Kwon // KSII Transactions on Internet and Information Systems. 2019. Vol. 13. No. 8. pp. 4227-4240.
16. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М.: Советское радио, 1974. 276 с.
17. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высш. шк., 1977. 448 с.
18. Уолтер, Карлтон Х. Антенны бегущей волны / Пер. с англ. А.Д. Иванова и др.; под общ. ред. канд. техн. наук А.Ф. Чаплина. М.: Энергия, 1970. 448 с.

Поступила 10.10.2021; принята к публикации 16.12.2021

#### Информация об авторах

**Николаев Валерий Иванович** – д-р техн. наук, научный референт, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, д. 14), e-mail: nivis@mail.ru

**Пастернак Юрий Геннадьевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84); АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, д. 14); АО НПП «Автоматизированные системы связи» (394062, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, д. 108, офис 415), e-mail: pasternak@yandex.ru

**Пендюрин Владимир Андреевич** – генеральный директор, АО НПП «Автоматизированные системы связи» (394062, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, д. 108, офис 415), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

### MULTIPATH ANTENNA SYSTEM OF THE VHF BAND BASED ON A LENS MADE OF GRANITE RUBBLE

V.I. Nikolaev<sup>1</sup>, Yu.G. Pasternak<sup>1,2,3</sup>, V.A. Pendyurin<sup>3</sup>, S.M. Fyedorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «Concern «Sozvezdie»

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>Research and Production Enterprise “Automated Communication Systems”, Voronezh, Russia

**Abstract:** we propose a design of a surface multi-beam antenna array based on a lens of crushed granite, which makes it possible to simultaneously form up to several tens of beams in the long-wave region of the VHF wave range. We estimated the

effective dielectric constant of crushed granite using the Lichtenecker formula for fine mixtures; its value is approximately equal to 3. To estimate the magnitude of the deceleration of surface waves in the lens, we used a technique to analyze the dispersion characteristics of a mirror dielectric waveguide; at a lens height of 1.8 meters, the effective dielectric constant of the equivalent mirror dielectric waveguide is 2.1. As irradiators of the lens - asymmetric electric vibrators located on a circle around the perimeter of the lens, the diameter of which is 30 meters; the diameter of the underlying steel surface is 40 meters. The proposed antenna system is characterized by a loss in rubble of about 3 dB with a lens diameter of about 3.8 wavelengths; the directivity of each beam can be about 15.5 dB, with the width of the main lobe in the azimuthal plane at half power level of about 10 degrees

**Key words:** ground antenna, lens antenna, multipath antenna system

### References

1. Dong X., Vuran M.C., Irmak S. "Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems", *Ad Hoc Networks*, Sep. 2013, vol. 11, no 7, pp. 1975-1987
2. Salam A., Vuran M.C., Irmak S. "Pulses in the sand: impulse response analysis of wireless underground channel," *Proc. of 35th IEEE INFOCOM 2016*, San Francisco, CA, April 2016, pp. 1-9
3. Salam A., Vuran M.C. "Smart underground antenna arrays: a soil moisture adaptive beamforming approach", *Proc. of the 36th IEEE INFOCOM 2017*, Atlanta, GA, USA, May 2017, pp. 1-9
4. Abrudan T.E., Kypris O., Trigoni N., Markham A. "Impact of rocks and minerals on underground magneto-inductive communication and localization", *IEEE Access*, 2016, vol. 4, pp. 3999-4010
5. Ritsema C.J., Kuipers H., Kleiboer L., Elsen E., Oostindie K., Wesseling J.G., Wolthuis J., Havinga P. "A new wireless underground network system for continuous monitoring of soil water contents," *Water Resources Research Journal*, May 2009, vol. 45, pp. 1-9.
6. Salam A., Vuran M.C., Irmak S. "Towards internet of underground things in smart lighting: a statistical model of wireless underground channel", *Proc. of the 14th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (IEEE ICNSC)*, Calabria, Italy, May 2017, pp. 574-579
7. Akyildiz I.F., Stuntebeck E.P. "Wireless underground sensor networks: Research challenges," *Ad Hoc Networks Journal (Elsevier)*, July 2006, vol. 4, pp. 669-686.
8. Zemmour H., Baudoin G., Diet A. "Soil effects on the underground-to-aboveground communication link in ultrawideband wireless underground sensor networks", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol. 16, pp. 218-221.
9. Tiusanen M.J. "Wideband antenna for underground Soil Scout transmission," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, December 2006, vol. 5, no. 1, pp. 517-519
10. Salam A., Vuran M.C., Dong X., Argyropoulos C., Irmak S. "A theoretical model of underground dipole antennas for communications in internet of underground things", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, vol. 67, no. 6, pp. 1-15.
11. Huo Y., Hu Q., Sun Y., Guo X., Qi L., Zhao X., Ding E. "Optimization of wireless communication coverage in underground tunnels based on zone division", *Int. J. of Antennas and Propagation*, 2020, pp. 1-15.
12. Yan L., Sunderman C., Whisner B., Damiano N., Zhou C. "Antenna arrangement investigation for through-the-earth (TTE) communications in coal mines", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ias.2015.7356912
13. Silva A.R., Vuran M.C. "Communication with aboveground devices in wireless underground sensor networks: an empirical study", *IEEE Int. Conf. on Communications*, 2010, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICC.2010.5502315>
14. Fedosov D.V., Kolesnikov A.V., Nikolaev A.V. "Advanced MF antennas for underground communications", *J. of Physics: Conf. Series*, 2021, pp. 1-7.
15. Kim M., Chae S., Shim Y., Lee D., Kim M., Moon Y., Kwon K. "Design and implementation of magnetic induction based wireless underground communication system supporting distance measurement", *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2019, vol. 13, no. 8, pp. 4227-4240
16. Zelkin E.G., Petrova R.A. "Lens antennas" ("Linzovye anteny"), Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 276 p.
17. Oreshkin P.T. "Physics of semiconductors and dielectrics" ("Fizika poluprovodnikov i dielektrikov"), Moscow: Vysshaya shkola, 1977, 448 p.
18. Walter C.H. "Traveling wave antennas", Moscow: Energiya, 1970, 448 p.

Submitted 10.10.2021; revised 16.12.2021

### Information about the authors

**Valeriy I. Nikolaev**, Dr. Sc. (Technical), Scientific Referent, «Concern «Sozvezdie» (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: [nivis@mail.ru](mailto:nivis@mail.ru)  
**Yuriy G. Pasternak**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), Scientific Referent, «Concern «Sozvezdie» (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia); JSC RPE "Automated Communication Systems" (of. 415, 108 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394062, Russia), e-mail: [pasternakyg@mail.ru](mailto:pasternakyg@mail.ru)  
**Vladimir A. Pandyurin**, General Director, JSC RPE "Automated Communication Systems" (of. 415, 108 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394062, Russia), e-mail: [infonpp-acc.ru@yandex.ru](mailto:infonpp-acc.ru@yandex.ru)  
**Sergey M. Fyedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: [fedorov\\_sm@mail.ru](mailto:fedorov_sm@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## *Машиностроение и машиноведение*

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.6.015

УДК 621.9.047; 621.9.048

### **КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ**

**В.П. Смоленцев, А.А. Извеков**

**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассмотрены вопросы изготовления открытых и полукрытых полостей в труднообрабатываемых деталях путем использования твердого электролита, наносимого на заготовку перед установкой удаляемой вставки. Показаны особенности протекания процесса анодного растворения припуска при статическом состоянии рабочей среды. Такие исследования выполнены впервые. Разработаны и проверены на практике изготовления типовых деталей режимы обработки для реализации процесса. Показано, что твердые электролиты имеют перспективы для дальнейшего использования при проектировании технологических процессов изготовления сложнопрофильных изделий из металлических труднообрабатываемых материалов, в том числе внедряемых на создаваемых образцах ракетно-космической техники. Они расширяют технологические возможности комбинированных методов, в которых одним из воздействующих факторов является электрическое и электромагнитное поле с высокой концентрацией мощности в импульсе. Впервые достигнута возможность разделять сборочные единицы путем образования зазора между сопрягаемыми деталями без доступа в зону обработки жидкой рабочей среды, определяющей возможность локального съема припуска в месте сопряжения и удаления слоя материала, достаточного для разборки узлов. Заложены основы использования для нанесения твердого электролита аддитивных технологий путем наращивания равномерных слоев перед сборкой изделия. Предлагаемая технология перспективна для изготовления сборных конструкций с ограниченным доступом инструмента в зону выполнения операции. Кроме того, новая технология может успешно применяться в процессе ремонта машин

**Ключевые слова:** технология, твердый электролит, анодный процесс, область применения

#### **Введение**

При использовании комбинированных методов обработки с анодным растворением припуска требуется обоснованно подвести токопроводящую жидкую среду в зону протекания процесса. В ряде случаев, особенно в случае применения жидкого электролита, это затруднительно или невозможно из-за ограниченного доступа инструмента к месту обработки. При малых объемах снимаемого материала количество используемого для прохождения реакции жидкой составляющей незначительно, что позволяет применять неподвижный твердый электролит.

#### **Область использования комбинированных методов обработки с твердым электролитом**

В приборостроении и авиакосмическом машиностроении имеется большое количество деталей и узлов, изготавливаемых с помощью технологической оснастки, удаляемой из детали до ее окончательной обработки. При этом требуется создать между контактирующими

поверхностями минимальные зазоры, достаточные для рассоединения элементов оснастки и детали. На рис. 1 приведены типовые детали, выполняемые с использованием закладных частей, где экономически обосновано применение комбинированной обработки с использованием твердого электролита.

На рис. 1а показаны спирали из тонкой проволоки, навитые в форме винтовой линии. Такие детали используются в световых приборах, например, в лампах накаливания, указателях, индикаторах, проволочных электрических сопротивлениях и для других деталей.

Подобные изделия (рис. 1б) применяются в системах охлаждения, где требуется через змеевик пропустить охладитель.

В авиационном машиностроении при изготовлении штампованных охлаждаемых лопаток (рис. 1в) применяют металлические вставки, которые затем вытравливают.

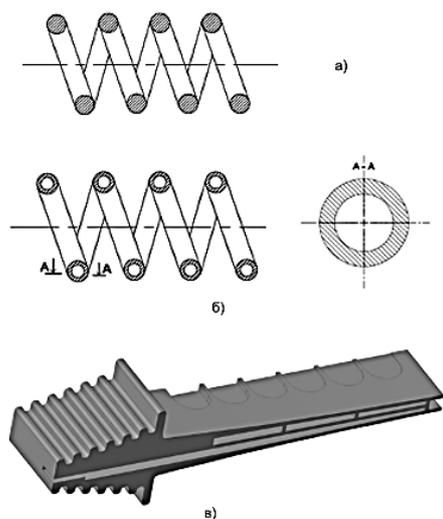


Рис. 1. Типовые детали для комбинированной обработки с использованием твердого наполнителя: а) проволочная спираль для световых приборов; б) змеевик системы охлаждения; в) охлаждаемая лопатка турбины

Такая технология описана в [1], где рассмотрены варианты одноканального и многоканального охлаждения с использованием дефлектора, устанавливаемого на место вставки после ее удаления. Иногда охлаждаемые лопатки выполняют путем сварки пустотелого пера с замком. Тогда проблема удаления вставки значительно упрощается, т.к. имеется открытый участок лопатки для извлечения дефлектора. Однако сам процесс вытравливания в концентрированных щелочах [1] опасен для здоровья исполнителей и вызывает растравливание металла детали, что нарушает ее качество при эксплуатации. Поэтому требуется разработка процесса удаления вставки, при котором не имеется негативных явлений. К таким условиям можно отнести комбинированную обработку с анодным растворением вставки в твердом электролите. Изменение размера вставки легко компенсировать напылением ее металлическим материалом.

#### Схемы обработки типовых деталей с твердым электролитом

Для типовых деталей, приведенных на рис. 1, могут использоваться технологические схемы, показанные на рис. 2.

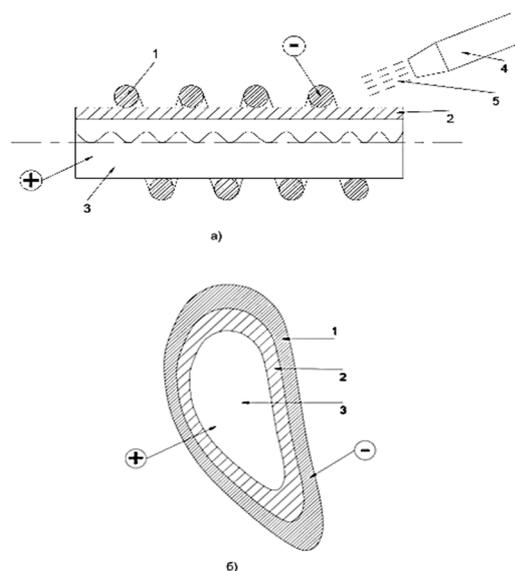


Рис. 2. Схемы обработки с твердым электролитом: а) удаление металлической вставки из спирали; б) удаление металлической вставки из охлаждаемой лопатки; 1 - деталь, 2 – твердый электролит, 3 – металлическая вставка, 4 – форсунка, 5 – жидкость, + - токоподвод к вставке (анод), - - токоподвод к детали (катод)

Для спиральных деталей (рис. 1,а,б) применяют металлические вставки 3, на которые предварительно наносят слой твердого электролита 2, например, из растворимого в воде хлористого натрия или солей серебра [2, 3] (рис. 2,а). Здесь спираль подключают к отрицательному полюсу низковольтного источника тока, а деталь является анодом. Для повышения производительности анодного растворения вставки 3 в место растворения припуска через форсунку 4 подают воду 5. С целью защиты установки от коротких замыканий вставку 3 перед обработкой деталь 1 закрепляют за свободный конец так, чтобы ее колебания в процессе обработки не превышали величины межэлектродного зазора.

Аналогичная схема обработки применяется для образования в охлаждаемой лопатке зазора между деталью и вставкой (рис. 2,в), где доступ жидкости к твердому электролиту затруднен. Применение впрыска воды, как это используется в схеме «а» (рис. 2), не достигает требуемого результата, но даже без этого по предлагаемой схеме удастся обеспечить получение зазора, достаточного для удаления вставки.

В [1] показана возможность штамповать охлаждаемые лопатки с образованием системы каналов внутри лопатки, где удаляемые вставки

представляют из себя (рис. 3) стержни с покрытием серебром и твердым электролитом (обычно на базе серебра).

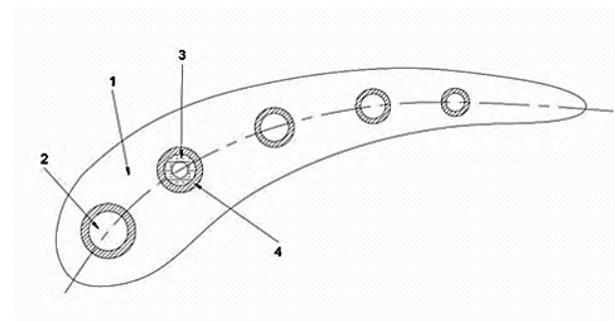


Рис. 3. Схема обработки охлаждаемых лопаток с многоканальными трактами для охладителя:  
1 – заготовка лопатки, 2 – вставка, 3 – слой серебра, 4 – твердый электролит

Перед установкой в заготовку 1 вставку 2 покрывают слоем серебра 3 на толщину 30-60 мкм. Покрытие на толщину менее 30 мкм может привести к нарушению равномерности покрытия после окончательной обработки. Слой серебра будет чередоваться с выступами материала вставки, что приведет к невозможности или затруднит удаление заполнителя после растворения слоя серебра. Покрытие вставки на толщину более 60 мкм приводит к увеличению времени обработки на 30-40%. На слой серебра 3 наносят твердый электролит 4 на толщину 10-50 мкм. Нанесение твердого электролита на толщину менее 10 мкм может привести к нарушению сплошности твердого электролита, пробоем межэлектродного промежутка. Толщина слоя 10-50 мкм обеспечивает устойчивое растворение слоя серебра, стабильное протекание процесса. Покрытие твердым электролитом на толщину более 50 мкм увеличивает время обработки на 10-20%.

В качестве твердого электролита может быть использован электролит, имеющий состав  $RbAg_4I_5$ . Этот электролит обладает высокой адгезией к серебру, что будет способствовать механической прочности вставки и покрытия. Подключение вставки, установленной в заго-

товку, к положительному полюсу источника питания, а самой заготовки лопатки – к отрицательному, обеспечивает протекание процесса анодного растворения слоя серебра. После его растворения вставка свободно удаляется из отверстия. Использование в качестве катода самой заготовки исключает травление металла, из которого она выполнена, что повышает точность и сохранение формы канала.

В качестве примера рассмотрена обработка 10 отверстий в лопатке по предлагаемому способу. Она проходит под током при напряжении 10-12В. На вставку подают положительный, а на лопатку – отрицательный потенциалы от источника постоянного или импульсного тока. Время растворения слоя серебра толщиной 40 мкм при толщине твердого электролита 30 мкм составляет 45-50 минут. Затем вставку удаляют из заготовки и приступают к контролю каналов.

### Заключение

Впервые рассмотрена возможность использования твердого электролита при комбинированной обработке с применением анодного растворения для удаления металлических технологических вставок без использования токсичных рабочих сред. Применение нового способа позволило получить качественные детали при минимальной трудоемкости операции и улучшить условия труда при изготовлении наукоемких изделий в различных отраслях машиностроения.

### Литература

1. Изготовление основных деталей и узлов авиадвигателей/ М.И. Евстигнеев, И.А. Морозов, А.В. Подзей, А.М. Сулима, И.С. Цуканов. М.: Машиностроение, 1972. 448 с.
2. Гусейнов Р.М., Кукоз Ф.И. Электронные процессы в твердых электролитах. Ростов: Изд. Ростовского государственного университета, 1986. 128 с.
3. Кукоз Ф.И., Труша Ф.Ф., Кондратенкова В.И. Тепловые химические источники тока. Ростов: Изд. Ростовского государственного университета, 1988. 196 с.

Поступила 14.10.2021; принята к публикации 17.12.2021

### Информация об авторах

**Смоленцев Владислав Павлович** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006 Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: 89036559970, e-mail: vsmolen@inbox.ru.

**Извеков Александр Андреевич** - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006 Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: 89038544706, e-mail: vmzizvekov@gmail.com

## COMBINED TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING PARTS IN SOLID ELECTROLYTES

V.P. Smolentsev, A.A. Izvekov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** we considered the issues of manufacturing open and semi-open cavities in difficult-to-machine parts by using solid electrolyte applied to the workpiece before installing the removable insert. We show the features of the process of anodic dissolution of the allowance at a static state of the working medium. Such studies have been performed for the first time. We developed and tested in practice the processing modes for the implementation of the process for the manufacture of standard parts. We show that solid electrolytes have prospects for further use in the design of technological processes for the manufacture of complex-profile products from metal hard-to-machine materials, including those introduced on the created samples of rocket and space technology. They expand the technological capabilities of combined methods, in which one of the influencing factors is an electric and electromagnetic field with a high concentration of power in a pulse. For the first time, the ability to separate assembly units by forming a gap between mating parts without access to the processing zone of a liquid working medium has been achieved, which determines the possibility of local removal of the allowance at the mating point and removal of a layer of material sufficient for disassembling the units. We laid the foundations for the use of additive technologies for applying solid electrolyte by building up uniform layers before assembling the product. The proposed technology is promising for the manufacture of prefabricated structures with limited tool access to the operation area. In addition, the new technology can be successfully applied in the process of car repair

**Key words:** technology, solid electrolyte, anodic process, application area

### References

1. Evstigneev M.I., Morozov I.A., Podzey A.V., Sulima A.M., Tsukanov I.S. "Production of the main parts and assemblies of aircraft engines" ("Izgotovlenie osnovnykh detaley i uzlov aviadvigately"), Moscow: Masinostroenie, 1972, 448 p.
2. Guseynov R.M., Kukoz F.I. "Electronic processes in solid electrolytes" ("Elektronnyye protsessy v tverdykh elektrolitakh"), Rostov State University, 1986, 128 p.
3. Kukoz F.I., Trusha F. F., Kondratenkova V.I. "Thermal chemical sources of current" ("Teplovye khimicheskie istochniki toka"), Rostov State University, 1988, 196 p.

Submitted 14.10.2021; revised 17.12.2021

### Information about the authors

**Vladislav P. Smolentsev**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vsmolen@inbox.ru, tel. +79036559970

**Aleksandr A. Izvekov**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vmzizvekov@gmail.com, tel. +79038544706

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДВУХКАМЕРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

А.Ю. Боташев<sup>1</sup>, А.А. Мусаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Россия

<sup>2</sup>Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, Россия

**Аннотация:** проведен анализ технологических возможностей двухкамерных устройств для листовой штамповки с одной и двумя камерами сгорания. В устройствах с одной камерой сгорания штамповка детали происходит в холодном состоянии заготовки под действием на нее гибкой среды за счет кинетической энергии поршня, ускоряемого продуктами сгорания газообразной топливной смеси. В устройствах с двумя камерами сгорания процесс штамповки совершается с нагревом заготовки воздействием на нее горячего газа, образованного при сгорании в верхней камере предварительно сжатой топливной смеси. При этом сжатие смеси осуществляется за счет энергии продуктов сгорания, образованных в нижней камере сгорания. Доказано, что устройства с одной камерой сгорания целесообразно использовать для штамповки из пластичных сортов сталей деталей разнообразной формы толщиной до 4 мм и из пластичных цветных сплавов толщиной до 8 мм. Устройства с двумя камерами сгорания целесообразно использовать для штамповки деталей из малопластичных сортов алюминиевых, титановых сплавов и других труднодеформируемых сплавов. Двухкамерные устройства для листовой штамповки обладают широкими технологическими возможностями и могут быть эффективно использованы в мелкосерийных производствах для штамповки деталей различной формы

**Ключевые слова:** листовая штамповка, двухкамерное устройство для штамповки, процесс штамповки, нагрев заготовки

### Введение

В настоящее время в промышленном производстве металлических изделий, в частности штампованных изделий, немалая доля малых предприятий, выпускающих такие изделия сравнительно небольшими партиями. В условиях малых предприятий вследствие малой серийности производимой продукции использование традиционного штамповочного оборудования [1, 2] недостаточно рентабельно. Для таких предприятий требуется малогабаритное и недорогое штамповочное оборудование, обладающее достаточно широкими технологическими возможностями. В этой связи разработка и создание такого оборудования является актуальной задачей. Одним из видов малогабаритного штамповочного оборудования являются двухкамерные штамповочные устройства [3, 4], которые относятся к импульсным устройствам обработки металлов давлением [5-8]. Эти двухкамерные устройства имеют несколько разновидностей: устройства с одной камерой сгорания, с двумя камерами сгорания и устройства с дополнительным поршнем. Целью данной работы является определение рациональной сферы использования двухкамерных устройств для листовой штамповки. Для листовой штамповки

предназначены первые два типа двухкамерных устройств, поэтому будем анализировать только их. Для достижения этой цели мы поставили перед собой следующие задачи: сравнение технических характеристик указанных устройств, оценка их технологических возможностей и установление рациональной сферы их использования.

### Анализ двухкамерных устройств с одной камерой сгорания

Схема двухкамерного устройства для листовой штамповки с одной камерой сгорания показана на рис. 1. Конструкция и работа данного устройства описана в работе [3]. Для совершения рабочего хода устройства рабочий цилиндр 6 наполняется сжатым воздухом, а камера сгорания 1 с форкамерой 18 наполняются топливной смесью давлением [7], равным давлению сжатого воздуха. При сгорании топливной смеси давление в камере сгорания 1 увеличивается в 7,5...8,5 раз. Под действием этого давления поршень 4 разгоняется и движется к штампуемой заготовке 12, вытесняя при этом сжатый воздух из цилиндра 6 через клапан 7. Процесс штамповки осуществляется за счет соударения эластичного диска 5 с заготовкой 12.

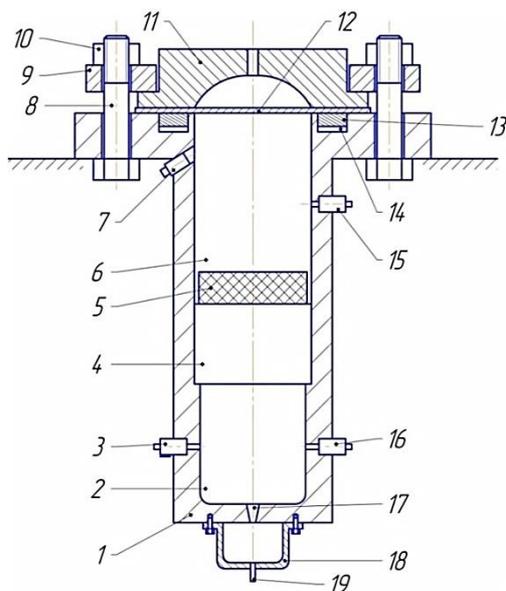


Рис. 1. Схема двухкамерного устройства для листовой штамповки с одной камерой сгорания: 1 – корпус; 2 - камера сгорания; 3, 7 – клапаны выпускные; 4 – поршень; 5 – диск эластичный; 6 - рабочий цилиндр; 8 – болт; 9 – плита; 10 – гайка; 11 – матрица; 12 - заготовка; 13 – поршень кольцевой; 14 – полость кольцевая; 15, 16 – впускные клапаны; 17 – канал; 18 – форкамера; 19 - свеча зажигания

Оценим технологические возможности данного устройства. Процесс штамповки осуществляется за счет кинетической энергии поршня 4 и диска 5, которая численно равна разности работ, совершаемых продуктами сгорания и воздуха, находящегося над диском 5. Эта энергия может быть определена, используя следующие зависимости [4]:

$$E_n = P_c V_k A, \quad (1)$$

$$A = \frac{\lambda}{k-1} \left( 1 - \left( \frac{V_u}{V_k} + 1 \right)^{1-k} \right) - \frac{V_u}{V_k}, \quad (2)$$

где  $E_n$  - кинетическая энергия поршня и диска, Дж;

$V_k$  - объем камеры сгорания, м<sup>3</sup>;

$V_u$  - объем рабочего цилиндра, м<sup>3</sup>;

$P_c$  - давление топливной смеси, Па;

$\lambda$  - степень повышения давления в камере сгорания;

$k$  - показатель адиабаты продуктов сгорания.

С увеличением соотношения объемов  $V_u/V_k$  кинетическая энергия поршня сначала интенсивно увеличивается, а затем темп ее роста снижается, но при этом габаритные размеры штамповочного устройства неуклонно увеличиваются. Поэтому рациональные значения

$V_u/V_k$  находятся в пределах 3...4. Исходя из этого примем  $V_u/V_k = 3$ . Для газозвудушных топливных смесей осредненное значение  $\lambda$  может быть принято равным 8, а осредненное значение показателя адиабаты  $k$  продуктов их сгорания можно принять равным 1,28. Исходя из этого из зависимости (2) получим  $A=6,19$ . Тогда, учитывая, что объем камеры сгорания  $V_k = 0,25\pi d_k^2 h_k$ , зависимость (1) можно представить в следующем виде:

$$E_n = 1,547\pi d_k^2 h_k P_c \quad (3)$$

где  $d_k, h_k$  - диаметр и высота камеры сгорания, м.

Кинетическая энергия поршня и диска, определяемая по зависимости (3), затрачивается на совершение процесса штамповки. Рассмотрим этот процесс для случая штамповки полого цилиндра максимально возможного диаметра, т.е. диаметра, равного диаметру камеры сгорания (рис. 2).

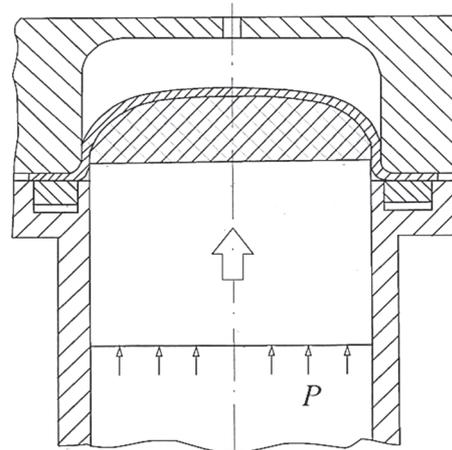


Рис. 2. Схема штамповки полого цилиндра

Работу, совершаемую при штамповке такого цилиндра воздействием упругой среды, можно приближенно определить по следующей зависимости:

$$L = K_1 K_2 \pi d_k \delta \sigma_s h_u, \quad (4)$$

где  $\delta, h_u$  - толщина и глубина полого цилиндра соответственно, м;

$\sigma_s$  - предел текучести материала штампуемой заготовки, Па;

$K_1$  - коэффициент, учитывающий работу деформирования упругой среды;

$K_2$  - коэффициент, учитывающий упрочнение материала заготовки.

Максимально возможная глубина штампуемого полого цилиндра не превышает его ради-

уса. Исходя из этого, можно записать  $d_{к\max} \approx 0,5d_к$ .

Тогда зависимость (4) можно представить в следующем виде:

$$L_{\max} = 0,5K_1K_2\pi d_к^2 \delta \sigma_s \quad (5)$$

Кинетическая энергия поршня с диском должна соответствовать работе деформирования обрабатываемой заготовки, поэтому

$$E_n = L_{\max}.$$

Тогда, учитывая зависимости (3) и (5), получим следующее уравнение

$$1,547\pi d_к^2 h_к P_c = 0,5K_1K_2\pi d_к^2 \delta \sigma_s \quad (6)$$

Из этого уравнения получим зависимость для определения максимальной толщины штампуемой заготовки

$$\delta_{\max} = \frac{3,1P_c h_к}{K_1K_2\sigma_s} \quad (7)$$

На рис. 3 представлены графики зависимости  $\delta_{\max}$  от высоты камеры сгорания  $h_к$  при различных значениях  $\sigma_s$ . При построении этих графиков принято:  $P_c = 0,9 \text{ МПа}$ ;  $K_1 = 1,3$ ;  $K_2 = 1,1$ . При большем значении давления топливной смеси  $P_c$  величина  $\delta_{\max}$  пропорционально увеличивается.

Первый график относится к деталям, штампуемым из пластичных сплавов алюминия, магния, меди, предел текучести которых не превышает 100 МПа. При высоте камеры сгорания 400 мм обеспечивается штамповка таких деталей толщиной до 8 мм.

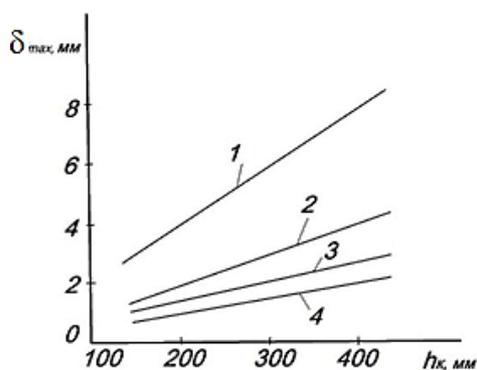


Рис. 3. Графики зависимости максимальной толщины штампуемых деталей от высоты камеры сгорания при разных значениях  $\sigma_s$ : 1 –  $\sigma_s = 100 \text{ МПа}$ ; 2 –  $200 \text{ МПа}$ ;

3 –  $\sigma_s = 300 \text{ МПа}$ ; 4 –  $\sigma_s = 400 \text{ МПа}$

Второй график относится к деталям из низкоуглеродистых сталей (Ст. 3, 08, 10 и др.) и нержавеющей сталей аустенитного класса (12Х18Н9, 08Х18Н10 и др.), предел текучести которых составляет около 200 МПа. При высоте камеры сгорания 400 мм толщина деталей штампованных из таких сплавов может достигать 4 мм.

Третий график относится к деталям, штампуемым из среднеуглеродистых сталей (Сталь 30, 40), предел текучести которых составляет около 300 МПа. Максимальная толщина таких деталей – 2,5...2,6 мм.

Четвертый график относится к деталям, штампуемым из сталей с пределом текучести порядка 400 МПа (Сталь 60, 50Г, 1Х13 и др.). При высоте камеры сгорания 400 мм обеспечивается штамповка таких деталей толщиной около 2 мм.

На основании изложенного можно заключить, что двухкамерное устройство для листовой штамповки с одной камерой сгорания позволяет штамповать разнообразный ассортимент деталей, в частности, детали плоской, цилиндрической, конусообразной, ожевальтной форм и днища различной конфигурации из стали и цветных сплавов, т.е. обладает широкими технологическими возможностями.

### Анализ двухкамерных устройств с двумя камерами сгорания

Высокопрочные сплавы молибдена, вольфрама, титана и других тугоплавких металлов, а также некоторые сплавы алюминия имеют низкую пластичность. Поэтому штамповку деталей из таких материалов осуществляют с нагревом заготовки. Двухкамерное устройство с двумя камерами сгорания предназначено для штамповки деталей из таких материалов.

Схема данного устройства представлена на рис. 4. Конструкция и работа данного устройства описана в работе [4].

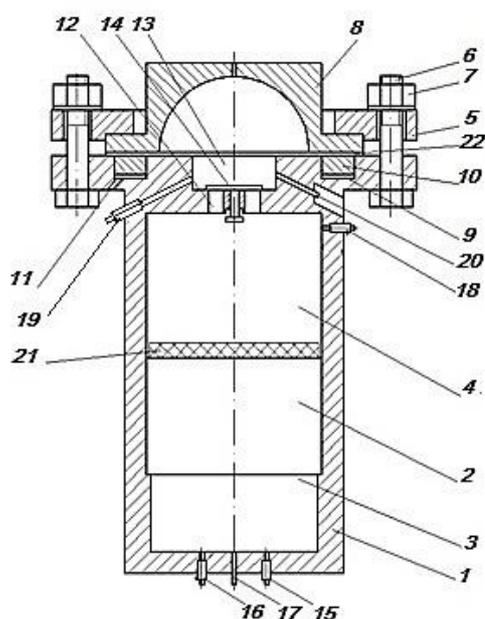


Рис. 4. Схема двухкамерного устройства для штамповки с двумя камерами сгорания: 1 - корпус; 2 - поршень; 3 - нижняя камера сгорания; 4 - рабочий цилиндр; 5 - фланец; 6 - болт; 7 - гайка; 8 - матрица; 9 - кольцевая полость; 10 - кольцевой поршень; 11 - канал; 12 - сквозные каналы; 13 - верхняя камера сгорания; 14 - тарельчатый клапан; 15, 18 - впускные клапаны; 16, 19 - выпускные клапаны; 17, 20 - свечи зажигания; 21 - резиновая пластина; 22 - штампуемая заготовка

Для совершения рабочего хода устройства камера сгорания 3 и рабочий цилиндр 4 через впускные клапаны 15 и 18 наполняются топливной смесью одинакового давления. При этом топливная смесь через каналы 12 поступает также в верхнюю камеру сгорания 13. Сначала зажигается топливная смесь в камере сгорания 3 свечей 17. За счет этого поршень 2 вытесняет топливную смесь из рабочего цилиндра 4 в верхнюю камеру сгорания 13. Это обеспечивает сжатие топливной смеси в верхней камере сгорания 13. В верхней камере сгорания 13 в конце хода поршня 2 свеча 20 производит зажигание сжатой топливной смеси. При этом давление в этой полости резко повышается, и тарельчатый клапан 14 перекрывает каналы 12, благодаря этому сгорание топливной смеси происходит в замкнутом объеме [12], что повышает давление продуктов сгорания. Далее заготовка 22 деформируется – осуществляется процесс штамповки.

Для оценки технологических возможностей данного устройства определим давление и температуру газа на поверхности штампуемой заготовки, образованного при сгорании сжатой топливной смеси. Сжатие топливной смеси

происходит за счет работы, совершаемой продуктами сгорания, образованными в нижней камере 3 сгорания. Будем считать, что сгорание топливной смеси в нижней камере 3 происходит при постоянном объеме, т.е. до начала движения поршня 2 [13], а затем продукты сгорания адиабатически расширяются. В течение рабочего хода поршня объем продуктов сгорания увеличивается от  $V_k$  до  $V_k + V_u$ .

Тогда, используя известные закономерности адиабатического процесса [10], работу, совершаемую продуктами сгорания, при их расширении можно выразить следующей зависимостью:

$$L_p = \frac{\lambda_r P_c V_k}{k_r - 1} \left( 1 - \frac{1}{(1 + v_u)^{k_r - 1}} \right), \quad (8)$$

где

$v_u = V_u / V_k$  - относительный объем рабочего цилиндра.

В процессе сжатия топливной смеси ее объем уменьшается от  $V_u + V_v$  до  $V_{вк}$ , где  $V_v$  - объем верхней камеры сгорания. Тогда, считая процесс сжатия адиабатическим, можно записать

$$\Pi = \frac{P_{c \max}}{P_c} = \left( \frac{V_u + V_v}{V_v} \right)^{k_c} = \left( 1 + \frac{v_u}{v_v} \right)^{k_c}, \quad (9)$$

где  $\Pi$  - степень повышения давления;

$v_v$  - относительный объем верхней камеры сгорания;

$k_c$  - показатель адиабаты топливной смеси.

Повышение давления топливной смеси сопровождается также увеличением ее температуры

$$\Pi_T = \frac{T_{c \max}}{T_c} = \Pi^{\frac{k_c - 1}{k_c}} = \left( 1 + \frac{v_u}{v_v} \right)^{\frac{k_c - 1}{k_c}}. \quad (10)$$

Используя вышеприведенные параметры, работа сжатия топливной смеси может быть выражена следующей зависимостью:

$$L_c = \frac{P_c V_k (v_u + v_v)}{k_c - 1} \left( \left( \frac{v_u + v_v}{v_v} \right)^{k_c - 1} - 1 \right) \quad (11)$$

Увеличение давления топливной смеси будет наибольшим, если работа сжатия  $L_c$  топливной смеси будет равна работе расширения продуктов сгорания, т.е.

$$L_c = L_p \quad (12)$$

Тогда из зависимости (8), (11), (12) получим следующее уравнение

$$\frac{v_u + v_g}{k_c - 1} \left( \left( \frac{v_u + v_g}{v_g} \right)^{k_c - 1} - 1 \right) = \frac{\lambda_V}{k_T - 1} \left( 1 - \frac{1}{(1 + v_u)^{k_c - 1}} \right). \quad (13)$$

Уравнение (13) решено графически [3], при этом получен график зависимости  $v_u$  от  $v_g$ . Используя этот график, определена оптимальная область значений этих параметров. При этом установлено, что оптимальными являются значения  $v_g$  в следующих пределах 0,1...0,4, а оптимальные значения  $v_u$  находятся в пределах 1,2...2,5, т.е. верхняя камера сгорания может составлять объем от 10% до 40% от объема нижней камеры сгорания, а рабочий цилиндр должен иметь объем в 1,2...2,5 раз больше объема нижней камеры сгорания. При этих значениях  $v_u$  и  $v_g$  величина  $\Pi$  изменяется в пределах 15...35, т.е. давление топливной смеси в верхней камере сгорания увеличивается в 15...35 раз. При этом повышается также температура топливной смеси, согласно зависимости (14) степень повышения температуры  $\Pi_T$  составляет 2,17...2,76, т.е. во столько раз увеличивается абсолютная температура топливной смеси.

При использовании однофазного компрессора для сжатия воздуха начальное давление топливной смеси  $P_c$  принимаем равным 0,9 МПа. Температуру топливной смеси примем  $t_c = 15^\circ\text{C}$ , при этом абсолютная ее температура  $T_c = t_c + 273 = 288 \text{ K}$ . Тогда топливная смесь в верхней камере сгорания 13 перед началом процесса сгорания имеет следующие параметры значения:

$$P_{c \max} = P_c \cdot \Pi = 0,9 \cdot (15 \dots 35) = 13,5 \dots 31,5 \text{ МПа};$$

$$T_{c \max} = T_c \cdot \Pi_T = 288 \cdot (2,17 \dots 2,76) = 625 \dots 795 \text{ K}.$$

При сгорании этой смеси давление в верхней камере сгорания 13 в зависимости от конфигурации штампуемой детали примерно увеличивается в 3,7...4,5 раз, причем большие значения их относятся к меньшим значениям  $\Pi$  [12]. Следовательно, давление газа, действующего на поверхность заготовки 22, может достигать 100...110 МПа, а его температура – 2700...2800 K. Это обеспечивает интенсивный нагрев заготовки и ее деформирование.

В процессе деформирования заготовки температура газа снижается за счет его расширения и нагрева заготовки, поэтому давление газа непрерывно уменьшается. В этой связи заполнение всей полости матрицы обеспечивается конечным значением давления газа, которое в 1,5...2 раза меньше начального его значения. Следовательно, максимальное давление в

конце процесса штамповки составляет 50...70 МПа. Поэтому данное устройство наиболее эффективно для штамповки днищ различной формы, деталей ожевальной, конусообразной и плоских форм. Оно менее эффективно для штамповки деталей цилиндрической и коробчатой форм, так как для заполнения углов матрицы с малыми радиусами закругления требуется высокое давление.

Обычно при штамповке труднодеформируемых сплавов алюминия заготовки нагреваются до 300...500 $^\circ\text{C}$ , сплавов титана – до 350...650 $^\circ\text{C}$ , сплавов молибдена – до 300...600 $^\circ\text{C}$ . Вышеприведенные параметры продуктов сгорания вполне достаточны для нагрева заготовок до таких температур.

Оценку максимальной толщины штампуемых деталей проведем на примере штамповки сферообразных днищ из сплава титана ВТ1, предел текучести которого составляет 250...380 МПа, при температуре 20 $^\circ\text{C}$ . При штамповке деталей из ВТ1 заготовки нагревают до 350...400 $^\circ\text{C}$ . Предел текучести заготовок при этих температурах примем равным 250 МПа. При штамповке сферообразного днища толщина его значительно меньше диаметра днища. Учитывая это, штампуемую заготовку можно считать тонкостенной оболочкой, подверженной внутреннему давлению. Тогда толщина заготовки определяется по следующей зависимости [11]:

$$S = \frac{Pr}{2\sigma_s}. \quad (14)$$

где  $P$  – действующее давление на поверхность заготовки, Па;

$r$  – радиус кривизны поверхности днища, м;

$\sigma_s$  – предел текучести материала днища, Па.

Учитывая значительный объем днища, давление газа в конечной стадии процесса штамповки примем равным 50 МПа. Тогда, считая  $\sigma_s = 250 \text{ МПа}$ , из зависимости (18) получим

$$S = 0,1r. \quad (15)$$

Радиус поверхности днищ чаще всего составляет не менее 100 мм. Согласно зависимости (15) при радиусе днища 100 мм толщина его может достигать 10 мм, а при радиусе 250 мм она может достигать 25 мм.

Следовательно, данное устройство обеспечивает штамповку деталей значительной толщины из труднодеформируемых сплавов.

### Заключение

1. Двухкамерные устройства для листовой штамповки за счет своих технологических возможностей могут быть эффективно использованы в мелкосерийных производствах для штамповки деталей различной формы, в частности, деталей цилиндрической, коробчатой, оживальной, сферообразной форм.

2. Двухкамерные устройства с одной камерой сгорания целесообразно использовать для штамповки из пластичных сортов стали деталей толщиной до 4 мм и из пластичных цветных сплавов деталей толщиной до 8 мм.

3. Двухкамерные устройства с двумя камерами сгорания осуществляют штамповку с нагревом заготовки. Их целесообразно использовать для штамповки деталей из труднодеформируемых сплавов.

### Литература

1. Ильин Л.Н., Семенов Е.И. Технология листовой штамповки. М.: Дрофа, 2009. 479 с.
2. Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для студентов высш. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 480 с.
3. Боташев А.Ю., Мусаев А.А. Разработка, исследование и создание двухкамерного устройства для газовой листовой штамповки// Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №3. С. 20-23.
4. Боташев А.Ю., Мусаев А.А. Исследование энергоэффективности двухкамерных импульсных устройств

для штамповки// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 4. С. 128-133.

5. О концепции использования технологических критериев для выбора импульсных технологий листовой штамповки / С.А. Бычков, В.К. Борисевич, В.С. Кривцов, А.П. Брагин // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 11. С. 222-231.

6. Сухов В.В. Опыт создания газозрывных систем с многоточечным инициированием детонации метано-кислородной смеси// Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 11. С. 182-185.

7. Бисилов Н.У. Исследование приемов расширения технологических возможностей высокоскоростной листовой штамповки: дис. канд. техн. наук: 05.02.09. Черкесск, 2014. 119 с.

8. Малсугенов Р.С. Исследование рабочего процесса устройства для газовой формовки с дополнительной камерой сгорания // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения: тр. Междунар. науч. конф. Липецк: ООО «Максимал информационные технологии», 2015.

9. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1980. 432 с.

10. Ерофеев В.Л., Семенов П.Д., Пряхин А.С. Теплотехника: учебник для вузов / Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.Л. Ерофеева. М.: ИКЦ «Академкнига», 2008. 488 с.

11. Гидромеханическая штамповка деталей трубопроводов/ В.П. Лукьянов, И.И. Маткаева, В.А. Бойко, Д.В. Доценко, В.А. Елхов. Волгоград: Панорама, 2007. 264 с.

12. Боташев А.Ю., Мусаев А.А. Совершенствование конструкции двухкамерного устройства для газовой штамповки// Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 12. С. 70-75.

13. Малсугенов Р.С. Разработка технологии и оборудования для газовой формовки с противодавлением тонколистовых деталей: дис. канд. техн. наук: 05.02.09. М., 2016. 145 с.

Поступила 05.10.2021; принята к публикации 15.12.2021

### Информация об авторах

**Боташев Анвар Юсуфович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и переработка материалов», Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: botashev11@mail.ru, тел.: +7(918)717-03-43

**Мусаев Абукаар Абдрахманович** - канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная механика и инженерная графика», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова (364051, Россия, Чеченская Республика, г. Грозный, проспект Имени Хусейна Абукааровича Исаева, 100), e-mail: brain\_95@mail.ru, тел.: +7(968)862-83-43

## ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF TWO-CHAMBER IMPULSE DEVICES FOR SHEET STAMPING

A.Yu. Botashev<sup>1</sup>, A.A. Musaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>North-Caucasian State Academy, Cherkessk, Russia

<sup>2</sup>Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia

**Abstract:** we carried out the analysis of technological capabilities of two-chamber devices for sheet stamping with one and two combustion chambers. In devices with one combustion chamber, the stamping process is carried out in the cold state of the workpiece by the action of an elastic medium on it, using the kinetic energy of the piston accelerated by the combustion products of the gaseous fuel mixture. In devices with two combustion chambers, the stamping process is carried out with the heating of the workpiece by the action of the hot gas formed during combustion in the upper chamber of the pre-compressed

fuel mixture. In this case, the mixture is compressed due to the energy of the combustion products formed in the lower chamber. We established that devices with one combustion chamber are expedient to be used for stamping parts of various shapes with a thickness of up to 4 mm and from plastic non-ferrous alloys with a thickness of up to 8 mm from ductile steels. Devices with two combustion chambers are advisable to be used for stamping parts from low-plastic grades of aluminum, titanium alloys and other hard-to-deform alloys. Two-chamber devices for sheet stamping have wide technological capabilities and can be effectively used in small-scale production for stamping parts of various shapes

**Key words:** sheet stamping, double-chamber stamping device, stamping process, workpiece heating

#### References

1. Il'in L.N., Semenov E.I. "Sheet stamping technology" ("Tekhnologiya listovoy shtampovki"), Moscow: Drofa, 2009, 479 p.
2. Bocharov Yu.A. "Forging and stamping equipment" ("Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie"), textbook, Moscow: Akademiya, 2008, 480 p.
3. Botashev A.Yu., Musaev A.A. "Development, research and creation of a two-chamber device for gas sheet stamping", *Blank Production in Mechanical Engineering (Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii)*, 2012, no. 3, pp. 20-23.
4. Botashev A.Yu., Musaev A.A. "Research of energy efficiency of two-chamber impulse devices for stamping", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 128-133.
5. Bychkov S.A., Borisevich V.K., Krivtsov V.S., Bragin A.P. "About the concept of using technological criteria for the selection of pulse technologies for sheet stamping", *Aviation and Space Engineering and Technology (Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya)*, 2007, no. 11, pp. 222-231.
6. Sukhov V.V. "Experience in creating gas-explosive systems with multi-point initiation of detonation of methane-oxygen mixture", *Aviation and Space Engineering and Technology (Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya)*, 2007, no. 11, pp. 182-185.
7. Bisilov N.Yu. "Investigation of methods for expanding the technological capabilities of high-speed sheet metal stamping" ("Issledovanie priyemov rasshireniya tekhnologicheskikh vozmozhnostey vysokoskorostnoy listovoy shtampovki"), Cand. Tech. Sciences dis., 05.02.09, Cherkessk, 2014, 119 p.
8. Malsugenov, R.S. "Investigation of the working process of a gas-forming device with an additional combustion chamber", *Proc. of the Int. Sci. Conf.: Modern Science: Actual Problems and Ways of Their Solution (Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya)*, Lipetsk: LLC "Maximal Information Technologies", 2015.
9. Zubtsov M.E. "Sheet stamping" ("Listovaya shtampovka"), Leningrad: Mashinostroenie, 1980, 432 p.
10. Erofeev V.L., Semenov P.D., Pryakhin A.S. "Heat engineering" ("Teplotekhnika"), textbook, Moscow: Akademkniga, 2008, 488 p.
11. Lukyanov V.P., Matkaeva I.I., Boyko V.A., Dotsenko D.V., Elkhov V.A. "Hydromechanical stamping of pipeline parts" ("Gidromekhanicheskaya shtampovka detaley truboprovodov"), Volgograd: Panorama, 2007, 264 p.
12. Botashev A.Yu., Musaev A.A. "Improvement of the design of a two-chamber device for gas stamping", *News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie)*, 2014, no. 12, pp. 70-75.
13. Malsugenov R.S. "Development of technology and equipment for gas forming with back pressure of thin-sheet parts" ("Razrabotka tekhnologii i oborudovaniya dlya gazovoy formovki s protivodavleniem tonkolistovykh detaley"), Cand. of Tech. Sci. dis., 05.02.09, Moscow, 2016, 145 p.

Submitted 05.10.2021; revised 15.12.2021

#### Information about the authors

**Anvar Yu. Botashev**, Dr. Sc. (Technical), Professor, North Caucasian State Academy (36 Stavropolskaya st., Cherkessk 369001, Karachay-Cherkess Republic, Russia), e-mail: botashev11@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9635-3040>  
**Abubakar A. Musaev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov (100 prospekt Imeni Khuseina Abubakarovicha Isaeva Grozny 364051, Chechen Republic, Russia), e-mail: brain\_95@mail.ru, tel.: +7 (968) 862-83-43

## ВЫЯВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ НАПЛАВЛЯЕМЫХ СЛОЕВ, А ТАКЖЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИХ ПЕРЕКРЫТИЯ НА ПОГРЕШНОСТЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АДДИТИВНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ

А.Н. Гречухин, В.В. Куц, П.С. Щербаков

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

**Аннотация:** статья посвящена изучению вопросов управления процессом аддитивного формообразования изделий. Представлены результаты исследования процесса аддитивного формообразования поверхности электрической дугой в среде защитного газа. Проведен анализ погрешности формы поверхностей, полученных с различным заполнением слоев. Подтверждено экспериментально, что такие параметры процесса, как ориентация слоев, коэффициент их перекрытия являются значимыми. Так, погрешность формообразования образцов наплавки слой на слой в вертикальном направлении выше по сравнению с другими способами наплавки, реализованными в эксперименте. Средние значения погрешности формы образцов составляют 0,75 мм, 0,88 мм, 1,15 мм, соответственно, для способов наплавки слой к слою на горизонтальную поверхность с коэффициентом перекрытия 0,3, слой к слою на горизонтальную поверхность с коэффициентом перекрытия 0,5, слой на слой в вертикальном направлении. Максимальные значения погрешности определены на уровне 0,85 мм, 1,2 мм, 1,5 мм для соответствующих способов наплавки, реализованных в эксперименте. Таким образом, пространственная ориентация слоев, а также коэффициент перекрытия слоев являются значимыми, оказывают влияние на численное значение погрешности формы получаемой поверхности, должны быть учтены при проектировании алгоритмов разделения на слои, их заполнения при аддитивном формообразовании электрической дугой в среде защитного газа

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, послойный синтез, формообразование, погрешность

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов СП-4738.2021.1

### Введение

Аддитивные технологии находят все более широкое применение практически во всех областях промышленности. Их применение на некоторых операциях технологического процесса изготовления изделий позволяет достигнуть значительного экономического эффекта. Расширение области применения аддитивных технологий стало возможным благодаря разработке новых способов, реализующих технологию аддитивного формообразования с применением различного материала построения, а также различных источников энергии [1-5, 11, 12].

### Анализ состояния вопроса

К одной из разновидностей обозначенной выше технологии является технология электродугового аддитивного выращивания с привлечением способов электродуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа. Такие способы обладают значительной энергоэффективностью и высокой производительностью, так, энергоэффективность некоторых способов MIG сварки может достигать до 90 % [6].

Способы аддитивного формообразования проволокой обладают рядом общих особенностей: наличие остаточных напряжений и деформации изделия; относительно низкая точность изготовления. Однако обозначенные выше способы являются активно развивающимися. Достаточно большое количество публикаций посвящено проблемам аддитивного производства на основе электродуговой сварочной технологии, одной из которых является проблема формирования структуры металла наплавляемых валиков [6-9]. Другой проблемой является обеспечение точности геометрии изделий, сформированных наплавляемыми валиками [10, 13-19]. Это может быть связано с тем, что область предыдущих слоев подвергается значительному нагреву, с этим фактом может быть связано некоторое ухудшение показателей относительного удлинения геометрии получаемых изделий. Может наблюдаться также изменение геометрии наплавленных слоев с увеличением высоты наплавляемого изделия.

### Постановка задачи исследования

Настоящее исследование посвящено изучению вопросов точности поверхности изде-

лий, формируемых путем наплавления материала построения электрической дугой в среде защитного газа.

В работе [17] были исследованы вопросы формирования погрешностей при механической обработке, погрешность обработки рассматривалась как результат действия соответствующих составляющих

$$\Delta r_0 = \Delta r_{ст} + \Delta r_{дин} + \Delta r_{тем} + \Delta r_{из.ин} + \Delta r_{из.ст}, \quad (1)$$

где  $\Delta r_{ст}$  – статическая составляющая погрешности обработки;  $\Delta r_{дин}$  – динамическая составляющая погрешности обработки;  $\Delta r_{тем}$  и  $\Delta r_{из.ин}$  – погрешности, вызванные соответственно температурными деформациями и износом инструмента;  $\Delta r_{из.ст}$  – погрешность, вызванная износом деталей узлов.

Следует отметить, что формообразование деталей методом наплавки электрической дугой в среде защитного газа, как и большинство способов аддитивного формообразования, характеризуется высокими значениями величины статической составляющей погрешности обработки, которая, в общем виде, может быть представлена в виде уравнения.

$$\Delta_r = \Delta_{r_1} + \Delta_{r_2}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{r_1}$  – погрешность положения,  $\Delta_{r_2}$  – погрешность формы.

На рис. 1 представлена схема формирования статической составляющей погрешности аддитивного формообразования электрической дугой в среде защитного газа с применением различной ориентации наплавляемых слоев.

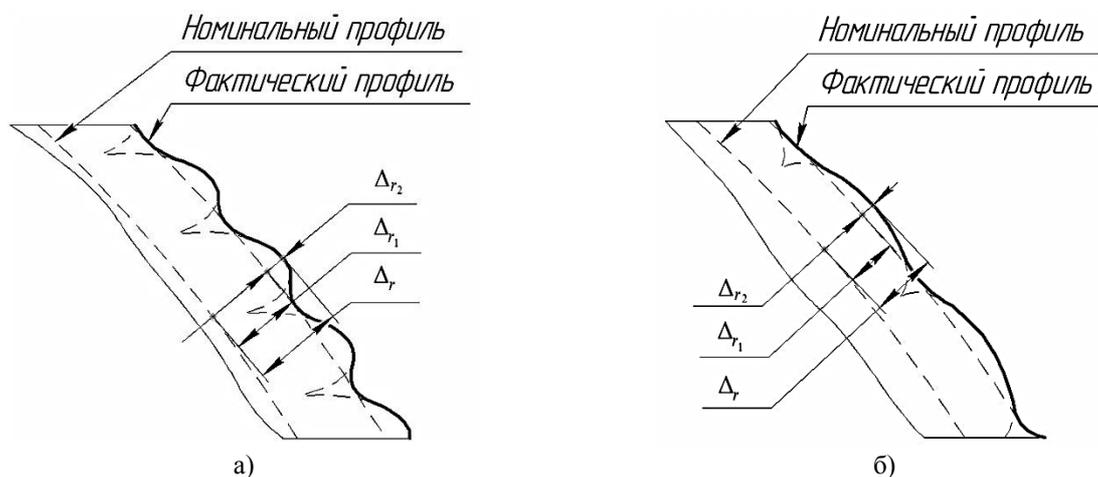


Рис. 1. Схема образования погрешности при формообразовании изделий аддитивными методами: а) при формировании слоев в вертикальном направлении; б) при формировании слоев в горизонтальном направлении;

$\Delta_r$  – суммарная погрешность,  $\Delta_{r_1}$  – погрешность положения,  $\Delta_{r_2}$  – погрешность формы

Опубликованы работы [20-24], в которых в результате проведенных теоретических исследований обозначено, что одной из мер снижения погрешности формы аддитивных методов формообразования может являться изменение пространственной ориентации наплавляемых слоев, однако отсутствуют сведения о результатах экспериментальных исследований, подтверждающих или опровергающих полученные результаты. Поэтому актуальной задачей исследования является проведение экспериментальных исследований, направленных на установление влияния изменения пространственной ориентации единичных наплавляемых слоев на погрешность формы получаемых изделий.

Также интерес представляет исследование влияния коэффициента перекрытия слоев, наплавляемых параллельно, на погрешность аддитивного формообразования электрической дугой в среде защитного газа.

Для решения обозначенных выше задач были проведены экспериментальные исследования.

#### Методика проведения исследований

Для проведения исследований был создан лабораторный стенд, состоящий из вертикально-фрезерного станка с числовым программным управлением модели 07Н25ПФ2, реализующий перемещение рабочего стола по 3 ко-

ординатным осям, позволяющий частично автоматизировать процесс постоянного наплавления. В качестве источника энергии для горения электрической дуги был применен сварочный полуавтомат инверторного типа модели Кедр MIG-160GDM MIG/MAG, MMA с системой подачи проволоки внутреннего исполнения.

Реализация процесса объемной электродуговой наплавки включала в себя следующие этапы: разработка модели наплавляемых единичных слоев - реализовано с помощью специализированной программы КОМПАС-3D V17.1; задание траектории движения исполнительных устройств станка – реализовано с помощью специализированного программного обеспечения.

Процесс наплавления производился в полуавтоматическом режиме с помощью сварочного полуавтомата на подготовленную подложку, закрепленную на столе станка. Для закрепления сварочной горелки был изготовлен держатель, который закреплялся на станине

станка. Базирование сопла сварочной головки производилось относительно поверхности заготовки. В качестве материала построения применялась проволока из стали марки 09Г2С диаметром 0,8 мм.

Были реализованы следующие схемы наплавления единичных слоев:

1. Слой к слою на горизонтальную поверхность с коэффициентом перекрытия 0,3;
2. Слой к слою на горизонтальную поверхность с коэффициентом перекрытия 0,5;
3. Слой на слой в вертикальном направлении.

Наплавление производилось в среде смеси аргона и углекислого газа в соотношении 12/88%. Режимы наплавления: скорость перемещения сварочной горелки 150 мм/мин.; скорость подачи материала построения – от 3,1 м/мин; напряжение на дуге – 17 вольт.

Наплавленные образцы представлены на рис. 2.



а)

б)

в)

Рис. 2. Экспериментальные образцы единичных слоев, наплавленные различными способами:

- а) слой на слой в вертикальном направлении; б) слой к слою на горизонтальную поверхность с коэффициентом перекрытия 0,3; в) слой к слою на горизонтальную поверхность с коэффициентом перекрытия 0,5

С помощью микроскопа малого инструментального было произведено измерение погрешности формы полученных образцов. Измерения производились в 3 сечениях в 24 точках каждого из изготовленных образцов.

### Результаты исследований и их анализ

Результаты измерения погрешности формы представлены на рис. 3 в виде столбчатой диаграммы.

Так, погрешность формообразования образцов наплавки слой на слой в вертикальном направлении оказалась выше по сравнению с

другими способами наплавки, реализованными в эксперименте. Средние значения погрешности формы образцов составляют 0,75 мм, 0,88 мм, 1,15 мм, соответственно, для способов наплавки слой к слою на горизонтальную поверхность с коэффициентом перекрытия 0,3, слой к слою на горизонтальную поверхность с коэффициентом перекрытия 0,5, слой на слой в вертикальном направлении. Максимальные значения погрешности определены на уровне 0,85 мм, 1,2 мм, 1,5 мм для соответствующих способов наплавки, реализованных в эксперименте. Результаты измерений представлены в графической форме на рис. 3.

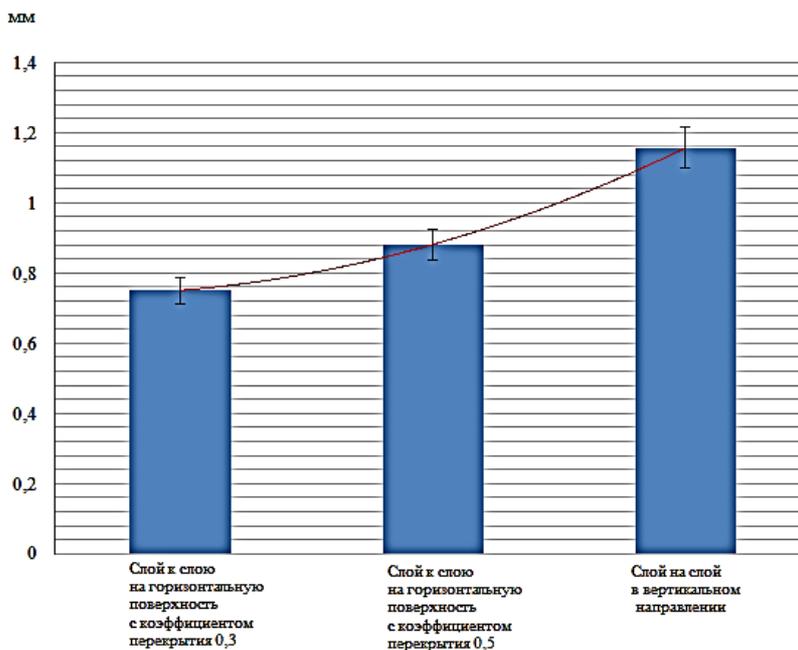


Рис. 3. Численное значение погрешности формообразования для различных вариантов наплавления слоев

Для подтверждения значимости факторов изменения пространственной ориентации слоев, а также коэффициента перекрытия слоев в процессе аддитивного формообразования изделий электрической дугой в среде защитного газа был проведен однофакторный дисперсионный анализ. Результаты анализа подтверждают результаты проведенных экспериментов и свидетельствуют о том, что пространственная ориентация слоев и коэффициент перекрытия слоев являются значимыми параметрами для управления погрешностью формообразования и должны учитываться при формировании поверхностей послойной электродуговой наплавкой электрической дугой в среде защитного газа.

### Заключение

Пространственная ориентация наплавленного слоя, а также коэффициент перекрытия наплавленных слоев оказывают влияние на величину погрешности формы при формообразовании поверхностей аддитивной наплавкой электрической дугой в среде защитного газа. Интерес для дальнейших исследований представляет получение регрессионных моделей влияния параметров процесса аддитивного формообразования электрической дугой в среде защитного газа на погрешность формы.

### Литература

1. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Englewood Cliffs, N.J., USA: PTR Prentice Hall, 1993. 369 pp.
2. Сапрыкин А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: дис.... канд. техн. наук: 05.03.01: защищена 19.11.06: утв. 13.04.07. Юрга: Томский политехнический университет, 2006.
3. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms / V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, N.A. Bychkova // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 24. С. 11832-11835.
4. Доброскок В.Л., Абдурайимов Л.Н., Чернышов С.И. Рациональная ориентация изделий при их послойном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3d модели // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2010. № 24. С. 13-21.
5. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. 2005. Vol. 2. Nos. 1-4. P. 319-328.
6. Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2006. № 28. P. 307-313.
7. Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm // Computers & Industrial Engineering. 2004. P. 426-431.
8. Hur J., Lee K. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 1998. № 14. P. 247-254.

9. Kim J.Y., Lee K., Park J.C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping // Technical Report, Department of Mechanical Design and Production Engineering. Seoul: Seoul National University. 1994.
10. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus / P.T. Lan, S.Y. Chou, L.L. Chent, D. Gemmill // Computer-Aided Design. 1997. Vol. 29. № 1. P. 53–62.
11. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping / S.H. Massod, W. Rattanawong, P. Iovenitti // J. Mater. Process. Technol. 2003. Vol. 139. № 1–3. P. 110–116
12. Masood S.H., Rattanawong W. A generic part orientation system based on volumetric error in rapid prototyping // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2002. № 19. P. 209–216.
13. Improving the accuracy of additive forming methods Innovation, quality and service in engineering and technology/ A.N. Grechukhin, V.V. Kuts, M.S. Razumov and others. 2018. Pp. 128-131
14. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Control of spatial orientation of robot units in the process of additive forming of products Bulletin of Voronezh state technical University. 2018. 4. Pp. 122-129
15. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Experimental determination of the cross-section parameters of a single layer in the additive forming products News of Tula state University. Technical science. 2019. 10. Pp. 264-270
16. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 7. Pp. 128-136. DOI 10.1051/mateconf/201822601004
17. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming – 2018 MATEC Web of Conferences. Vol. 7. Pp.142-150. DOI 10.1051/mateconf/201822601002
18. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitskiy A.V. Development and Research of Technological Equipment that Implements Dynamic Control of Process of Additive Fabrication of Parts of Complex Spatial Shapes Based on Mechanisms with a Hybrid Layout. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 709(3). 033112. DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033112
19. Investigation of the process of additive formation of fusible materials using a low-power solid-state laser/ V.V. Kuts, V.S. Merkulov, A.N. Grechukhin, A.S. Privalov// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1029(1). 012010. DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012010
20. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Solving Problem of Curved Surface Approximation by Layers with Constant and Variable Sections During Forming by Additive Methods. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. pp. 239–248. DOI 10.1007/978-3-030-22041-9\_28
21. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitskiy A.V. Control additive error of morphogenesis with the use of hybrid layout. AIP Conference Proceedings. 2019. 2188. 020003. DOI 10.1063/1.5138377
22. Grechukhin A.N., Privalov A.S., Garkavtseva P.A. Experimental studies of the process of additive electric arc forming in the environment of protective gases AIP Conference Proceedings. 2019. 2188. 020004. DOI 10.1063/1.5138378
23. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitskiy A.V. Control of geometrical parameters of a single layer at additive forming of products by FDM technology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 680(1). 012004. DOI 10.1088/1757-899X/680/1/012004
24. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Calculation of the controlled parameters of the 6-coordinate robot in the process of additive forming of products// Journal of Physics: Conference Series. 2019. 1210(1). 012053. DOI 10.1088/1742-6596/1210/1/012053

Поступила 08.11.2021; принята к публикации 17.12.2021

#### Информация об авторах

**Гречухин Александр Николаевич** - канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел.: 8(4712)222669, e-mail: Agrechuhin@mail.ru

**Куц Вадим Васильевич** - д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел.: 8(4712)222669, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

**Щербаков Павел Сергеевич** - аспирант, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел.: 8(4712)222669, e-mail: pasharazor46@mail.ru

### IDENTIFICATION OF THE INFLUENCE OF THE SPATIAL ORIENTATION OF THE DEPOSITED LAYERS, AS WELL AS THEIR OVERLAP COEFFICIENT ON THE SURFACE SHAPE ERROR DURING ADDITIVE SHAPING BY AN ELECTRIC ARC

A.N. Grechukhin, V.V. Kuts, P.S. Shcherbakov

Southwest State University, Kursk, Russia

**Abstract:** the article is devoted to the study of the issues of managing the process of additive shaping of products. The paper presents the results of a study of the process of additive surface shaping by an electric arc in a protective gas medium.

We analyzed the error of the shape of the surfaces obtained with different filling layers. We confirmed experimentally that such process parameters as the orientation of the layers, their overlap coefficient are significant. Thus, the error of forming samples of surfacing layer on layer in the vertical direction is higher compared to other methods of surfacing implemented in the experiment. The average values of the sample shape error are 0.75 mm, 0.88 mm, 1.15 mm, respectively, for methods of surfacing layer to layer on a horizontal surface with an overlap coefficient of 0.3, layer to layer on a horizontal surface with an overlap coefficient of 0.5, layer to layer in the vertical direction. The maximum error values are determined at the level of 0.85 mm, 1.2 mm, 1.5 mm for the corresponding surfacing methods implemented in the experiment. Thus, the spatial orientation of the layers, as well as the overlap coefficient of the layers, are significant, affect the numerical value of the shape error of the resulting surface, should be taken into account when designing algorithms for dividing into layers, filling them with additive shaping by an electric arc in a protective gas medium

**Key words:** additive technologies, layer-by-layer synthesis, shaping, error

**Acknowledgements:** the research was carried out with the financial support of the scholarship of the President of the Russian Federation for young scientists and postgraduates SP-4738.2021.1

### References

1. Burns M. "Automated production: Increasing productivity in production", Englewood Cliffs, New Jersey, USA: PTR Prentice Hall, 1993, 369 p.
2. Saprykin A.A. "Increasing the productivity of the selective laser sintering process in the manufacture of prototypes" ("Povyschenie proizvoditel'nosti protsesssa selektivnogo lazernogo spekaniya pri izgotovlenii prototipov"), Cand. of Tech. Sci. diss., 05.03.01, Yurga: Tomsk Polytechnic University, 2006.
3. Kutz V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Bychkova N.A. "Improving the quality of additive methods for shaping the surfaces of odd-shaped parts using parallel kinematics mechanisms", *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 24, pp. 11832-35.
4. Dobroskok V.L., Abdurayimov L.N., Chernyshov S.I. "Rational orientation of products during their layer-by-layer shaping based on the initial 3d triangulation model", *Scientific Notes of the Crimean Engineering Pedagogical University (Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta)*, 2010, no. 24, pp. 13-21.
5. Singal S.K., Pandey A.P., Pandey P.M., Nagpal A.K. "Optimal orientation of details deposition in stereolithography", *Computer-aided Design and Applications*, 2005, vol. 2, no. 1-4, pp. 319-328.
6. Hong S. Byun, Kwan H. Li "Determination of the optimal assembly direction during rapid prototyping with variable cutting", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2006, no. 28, pp. 307-313.
7. Hong S. Byun, Kwan H. Lee "Optimal orientation of rapid prototyping parts using a genetic algorithm", *Computers and Industrial Engineering*, 2004, pp. 426-431.
8. Khur J., Hur J., Lee K. "Development of a CAD environment for determining the preferred direction of expansion for multi-layer production", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1998, no. 14, pp. 247-254
9. Kim J.Y.S., Kim J.Y., Lee K., Park J.K. "Determination of the optimal orientation of a part during stereolithographic rapid prototyping", *Technical report*, Department of Mechanical Design and Production Technology, Seoul National University, 1994.
10. Lan P.T., Chow S.Ya., Chent L.L., Gemmill D. "Determination of the manufacturing orientation for rapid prototyping using a stereolithographic device", *Computer-aided Design*, 1997, vol. 29, no. 1, pp. 53- 62.
11. Massod S.H., Rattanavong U., Iovenitti P. "Universal algorithm of the system of orientation of parts for complex parts in rapid prototyping", *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, vol. 139, no. 1-3, pp. 110-116
12. Masud S.H., Rattanavong U. "A universal system for the orientation of parts based on a volumetric error during rapid prototyping", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2002, no. 19, pp. 209-216.
13. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Razumov M.S. et al. "Improving the accuracy of additive molding methods", *Innovations, Quality and Service in Engineering and Technology*, 2018, pp. 128-131
14. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Razumov M.S. "Control of the spatial orientation of robot nodes in the process of additive molding of products", *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2018, vol. 4, pp.122-129
15. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Razumov M.S. "Experimental determination of the parameters of the cross-section of one layer in additive molding products", *Proc. of Tula State University. Technical Sciences*, 2019, vol. 10, pp. 264-270
16. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. "Control of the spatial orientation of the final effector of the geometry generation system five-axis production equipment for additive geometry generation", *MATEC Web Conference*, 2018, vol. 7, pp. 128-136 DOI 10.1051/mateconf/201822601004
17. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Razumov M.S. "Ways to reduce the error of additive methods of formation", *2018 MATEC Web of Conferences*, vol. 7, pp. 142-150 DOI 10.1051/mateconf/201822601002
18. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V. "Development and research of technological equipment implementing dynamic control of the process of additive manufacturing of parts of complex spatial shape based on mechanisms with hybrid layout", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709(3), pp. 033112 DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033112

19. Kutz V.V., Merkulov V.S., Grechukhin A.N., Privalov A.S. "Investigation of the process of additive formation of fusible materials using a low-power solid-state laser", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1029(1), pp. 012010 DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012010
20. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Razumov M.S. "Solution of the problem of approximation of a curved surface by layers with constant and variable cross sections during molding by additive methods", *Lecture Notes on Mechanical Engineering*, 2020, pp. 239-248 DOI 10.1007/978-3-030-22041-9\_28
21. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V. "Control of additive error of morphogenesis using hybrid layout", *Materials of the AIP Conference*, 2019, vol. 2188, pp. 020003 DOI 10.1063/1.5138377
22. Grechukhin A.N., Privalov A.S., Garkavtseva P.A. "Experimental studies of the process of formation of an additive electric arc in a protective gas environment", *Materials of the AIP Conference*, 2019, vol. 2188, pp. 020004 DOI 10.1063/1.5138378
23. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V. "Control of geometric parameters of one layer during additive molding of products using FDM technology", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 680(1), pp. 012004 DOI 10.1088/1757-899X/680/1/012004
24. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Razumov M.S. "Calculation of controlled parameters of a 6-coordinate robot in the process of additive molding of products", *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1210(1), pp. 012053 DOI 10.1088/1742-6596/1210/1/012053

Submitted 08.11.2021; revised 17.12.2021

#### Information about the authors

**Aleksandr N. Grechukhin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, SWSU (94 50-letiya Oktyabrya str., Kursk305000, Russia), e-mail: Agrechuhin@mail.ru, tel.: +7(4712)222669

**Vadim V. Kuts**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor, SWSU (94 50-letiya Oktyabrya str., Kursk305000, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, tel.: +7 (4712)222669

**Pavel S. Shcherbakov**, graduate student, SWSU (94 50-letiya Oktyabrya str., Kursk305000, Russia), e-mail: pasharazor46@mail.ru, tel.: +7 (4712)222669